

**CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO PIEDRAS Y  
EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE RECURSO HÍDRICO PARA  
MEJORAR LA OFERTA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA A LA CIUDAD DE  
SANTA MARTA D.T.C.H.**



**ALEJANDRA LONDOÑO GONZÁLEZ  
FERNANDO JAVIER ORTÍZ PÉREZ**

**UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
SANTAMARTA D.T.C.H.**

**2005**

**CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO PIEDRAS Y  
EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE RECURSO HÍDRICO PARA  
MEJORAR LA OFERTA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA A LA CIUDAD DE  
SANTA MARTA D.T.C.H.**

**ALEJANDRA LONDOÑO GONZÁLEZ  
FERNANDO JAVIER ORTÍZ PÉREZ**

**Proyecto de grado para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Director:  
NELSON MARTÍNEZ ESCORCIA  
Ingeniero Civil**

**Jurados:  
Ingeniero ROBERTO MONTIEL  
Ingeniero FERNANDO ARRIETA**

**UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
SANTAMARTA D.T.C.H.**

**2005**

---

Los sueños son motivo de lucha para progresar en la vida,  
años atrás se inicio el sueño de ser ingenieros, el cual se  
alcanzó con mucho sacrificio gracias a Dios.

Pero este sueño no hubiera sido realidad sin la ayuda, apoyo,  
colaboración y sacrificio de esos seres tan maravillosos,  
nuestros padres. Que además de darnos la vida han sido  
nuestros guías y grandes consejeros a lo largo de nuestras  
vidas, por esto y todas las cosas tan hermosas brindadas les  
dedicamos a ustedes, Cecilia González, Mario Londoño,  
Marta Pérez y Fernando Ortiz, este triunfo que tan bien es de  
ustedes.

Gracias; infinitos agradecimientos por que sin su ayuda  
este sueño no hubiese sido realidad.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1. OBJETIVOS</b>	<b>2</b>
<b>1.1 OBJETIVO GENERAL</b>	<b>2</b>
<b>1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>2</b>
<b>2. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE</b>	<b>3</b>
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<b>5</b>
<b>4. GENERALIDADES DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO PIEDRAS</b>	<b>8</b>
<b>4.1 DELIMITACIONES DEL ESPACIO TEMPORAL Y GEOGRÁFICO</b>	<b>8</b>
<b>4.2 FISIOGRAFÍA</b>	<b>8</b>
<b>4.3 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA</b>	<b>10</b>
<b>4.4 CLIMA</b>	<b>12</b>
<b>4.5 HIDROGRAFÍA</b>	<b>13</b>
<b>4.6 VEGETACIÓN</b>	<b>13</b>
<b>4.7 SUELOS Y USO ACTUAL</b>	<b>15</b>
<b>5. CARACTERÍSTICAS MORFOLOGICAS DE LA CUENCA Y LA SUBCUENCA DEL RÍO PIEDRAS</b>	<b>19</b>
<b>5.1 FORMA DE LA CUENCA</b>	<b>21</b>
<b>5.1.1 Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad (Kc)</b>	<b>21</b>
<b>5.1.2 Factor de Forma (Kf)</b>	<b>22</b>
<b>5.1.3 Relaciones del área</b>	<b>22</b>
<b>5.2 SISTEMA DE DRENAJE</b>	<b>23</b>
<b>5.2.1 Número de Orden de la Corriente (N)</b>	<b>23</b>
<b>5.2.2 Densidad de drenaje (Dd)</b>	<b>23</b>
<b>5.2.3 Longitud de flujo de superficie (Lo)</b>	<b>24</b>
<b>5.2.4 Sinuosidad de las corrientes de agua (S)</b>	<b>25</b>
<b>5.3 CARACTERÍSTICAS DEL RELIEVE DE LA CUENCA</b>	<b>26</b>

5.3.1 Pendiente de la cuenca	26
5.3.2 Curva hipsométrica	30
5.3.3 Pendiente de la corriente principal	40
5.3.4 Rectángulo Equivalente	42
5.3.5 Tiempo de Concentración	43
6. EVALUACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DE LA CUENCA Y LA SUBCUENCA DEL RÍO PIEDRAS	45
6.1 PRECIPITACIÓN	47
6.1.1 Medidas pluviométricas	47
6.1.2 Análisis estadístico de los datos de precipitación	49
6.1.3 Precipitación media	51
6.1.3.1 Polígonos de Thiessen	51
6.1.3.2 Isoyetas	55
6.1.4 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia IDF	57
6.2 INFILTRACIÓN	61
6.2.1 Clasificación hidrológica de los suelos según la Soil Conservation Service	62
6.2.1.1 Clasificación hidrológica de los suelos	63
6.2.1.2 Condición de humedad antecedente	64
6.2.1.3 Determinación del número de curva de escorrentía CN	65
6.2.1.4 Estimación de la escorrentía directa $P_e$ según retención potencial máxima	67
S	
6.3 EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN	68
6.3.1 Método de Thornthwaite	69
6.4 HIDROGRAMA	71
6.4.1 Hidrograma Unitario de Williams y Hann	72
6.4.1.1 Parámetros K y $T_p$ del modelo	74
6.4.1.2 Tiempos y Parámetros	74
6.4.1.3 Construcción del Hidrograma Unitario Sintético de Williams y Hann	75
7. MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA Y SUBCUENCA DEL RÍO PIEDRAS	80
8. MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL RÍO PIEDRAS CON EL	84

<b>PROGRAMA HIDROSIG JAVA</b>	
<b>8.1 ALIMENTACIÓN DEL PROGRAMA</b>	<b>84</b>
<b>8.2 RESULTADOS</b>	<b>86</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>109</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>110</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>113</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>114</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1. Localización general de la cuenca del Río Piedras</b>	<b>9</b>
<b>Figura 2. Cuenca y subcuenca del Río Piedras. Red de drenaje</b>	<b>14</b>
<b>Figura 3. Curvas de nivel de la cuenca del Río Piedras</b>	<b>20</b>
<b>Figura 4. Curva Hipsométrica de la Cuenca del Río Piedras</b>	<b>33</b>
<b>Figura 5. Curva Hipsométrica de la Subcuenca del Río Piedras</b>	<b>35</b>
<b>Figura 6. Cálculo de la elevación media de una hoya</b>	<b>36</b>
<b>Figura 7. Rectángulo equivalente</b>	<b>38</b>
<b>Figura 8. Asignación de las elevaciones correspondientes a cada área del rectángulo equivalente</b>	<b>38</b>
<b>Figura 9. Sólido de volumen equivalente</b>	<b>39</b>
<b>Figura 10. Determinación de la elevación media de la cuenca con el método de los volúmenes</b>	<b>39</b>
<b>Figura 11. Perfil del río Piedras en toda la cuenca</b>	<b>41</b>
<b>Figura 12. Perfil del río Piedras hasta el límite de la subcuenca</b>	<b>41</b>
<b>Figura 13. Localización estaciones hidrometeorológicas IDEAM</b>	<b>46</b>
<b>Figura 14. Polígonos de Thiessen</b>	<b>53</b>
<b>Figura 15. Isoyetas de la cuenca y la subcuenca del Río Piedras</b>	<b>56</b>
<b>Figura 16. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación Parque Tayrona Correlacionado</b>	<b>60</b>
<b>Figura 17. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación San Lorenzo</b>	<b>61</b>
<b>Figura 18. Curvas Hidrograma Unitario Instantáneo de Williams y Hann</b>	<b>73</b>
<b>Figura 19. Hidrograma Unitario de la Cuenca del Río Piedras</b>	<b>77</b>
<b>Figura 20. Hidrograma Unitario de la Subcuenca del Río Piedras</b>	<b>78</b>
<b>Figura 21. Modelación hidrológica de la cuenca del Río Piedras aplicando el método abcd de Thomas</b>	<b>82</b>
<b>Figura 22. Modelación hidrológica de la subcuenca del Río Piedras aplicando el método abcd de Thomas</b>	<b>83</b>

<b>Figura 23. MDT procesado en HidroSIG con el Río Piedras y su cuenca trazados</b>	<b>86</b>
<b>Figura 24. Cuenca del Río Piedras en tres dimensiones generada por HidroSIG</b>	<b>87</b>
<b>Figura 25. Mapas de precipitación total mensual multianual de los meses enero, febrero, marzo y abril</b>	<b>88</b>
<b>Figura 26. Mapas de precipitación total mensual multianual de los meses mayo, junio, julio y agosto</b>	<b>89</b>
<b>Figura 27. Mapas de precipitación total mensual multianual de los meses septiembre, octubre, noviembre y diciembre</b>	<b>90</b>
<b>Figura 28. Mapa de precipitación total anual multianual de la cuenca del Río Piedras</b>	<b>91</b>
<b>Figura 29. Mapas de evapotranspiración total mensual multianual de los meses enero, febrero, marzo y abril</b>	<b>92</b>
<b>Figura 30. Mapas de evapotranspiración total mensual multianual de los meses mayo, junio, julio y agosto</b>	<b>93</b>
<b>Figura 31. Mapas de evapotranspiración total mensual multianual de los meses septiembre, octubre, noviembre y diciembre</b>	<b>94</b>
<b>Figura 32. Mapa de evapotranspiración total anual multianual de la cuenca del Río Piedras</b>	<b>95</b>
<b>Figura 33. Curva Hipsométrica de la cuenca de Río Piedras calculada por HidroSIG</b>	<b>97</b>
<b>Figura 34. Curva Hipsométrica de la subcuenca de Río Piedras calculada por HidroSIG</b>	<b>98</b>
<b>Figura 35. Ciclo anual de caudales de la cuenca calculado por HidroSIG</b>	<b>99</b>
<b>Figura 36. Ciclo anual de caudales de la subcuenca de Río Piedras calculado por HidroSIG</b>	<b>100</b>
<b>Figura 37. Comparación de las modelaciones hidrológicas de la cuenca de Río Piedras</b>	<b>101</b>
<b>Figura 38. Comparación de las modelaciones hidrológicas de la subcuenca de Río Piedras</b>	<b>102</b>
<b>Figura 39. Representación gráfica de los aforos del Río Piedras a la altura de la captación de Metroagua</b>	<b>104</b>



- Figura 40. Representación gráfica de los Caudales disponibles y captados del Río Piedras a la altura de la captación del acueducto distrital. 106**
- Figura 41. Representación gráfica de los Caudales disponibles y captados del Río Piedras a la altura de la captación del acueducto distrital si se llegase a conceder el aumento del caudal de concesión 108**

## LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Cálculo de la pendiente media de la Cuenca del Río Piedras	28
Cuadro 2. Cálculo de la pendiente media de la Subcuenca del Río Piedras	29
Cuadro 3. Cálculo de la curva hipsométrica de la Cuenca del Río Piedras	31
Cuadro 4. Cálculo de la curva hipsométrica de la Subcuenca del Río Piedras	34
Cuadro 5. Variación de la pendiente del Río Piedras a lo largo de su eje en la cuenca y la subcuenca	42
Cuadro 6. Cálculo del factor de corrección de la precipitación registrada en la estación Parque Tayrona	47
Cuadro 7. Estaciones hidrometeorológicas representativas para la Cuenca del Río Piedras	48
Cuadro 8. Selección de la función de distribución	51
Cuadro 9. Cálculo de la precipitación total anual y media total mensual de la cuenca del Río Piedra	54
Cuadro 10. Cálculo de la precipitación total anual y media total mensual de la subcuenca del Río Piedras	54
Cuadro 11. Determinación de la precipitación total anual y media total mensual de la Subcuenca del Río Piedras por el método de las isoyetas	55
Cuadro 12. Precipitaciones e intensidades (mm/h) para cada duración según el período de retorno para la estación Parque Tayrona Correlacionado	57
Cuadro 13. Precipitaciones e intensidades para cada duración según el período de retorno para la estación San Lorenzo	58
Cuadro 14. Determinación de la Curva Número de la cuenca del Río Piedras por el método de las isoyetas	66
Cuadro 15. Determinación de la Curva Número de la subcuenca del Río Piedras por el método de las isoyetas	66
Cuadro 16. Infiltración en la Cuenca del Río Piedras	67
Cuadro 17. Infiltración en la Subcuenca del Río Piedras	68

<b>Cuadro 18. Determinación de la evapotranspiración en la subcuenca del Río Piedras (estación San Lorenzo)</b>	<b>70</b>
<b>Cuadro 19. Determinación de la evapotranspiración en la estación Parque Tayrona</b>	<b>70</b>
<b>Cuadro 20. Determinación de la evapotranspiración en la cuenca del Río Piedras (ponderación)</b>	<b>71</b>
<b>Cuadro 21. Datos para determinar el Hidrograma Unitario de la Cuenca y la Subcuenca del Río Piedras</b>	<b>76</b>
<b>Cuadro 22. Comparación de los posibles caudales máximos en la cuenca del Río Piedras</b>	<b>79</b>
<b>Cuadro 23. Datos para determinar la modelación hidrológica de la cuenca del Río Piedras</b>	<b>82</b>
<b>Cuadro 24. Datos para determinar la modelación hidrológica de la subcuenca del Río Piedras</b>	<b>83</b>
<b>Cuadro 25. Comparación de los resultados calculados y arrojados por HydroSIG</b>	<b>96</b>
<b>Cuadro 26. Comparación de las modelaciones hidrológicas de la cuenca de Río Piedras</b>	<b>101</b>
<b>Cuadro 27. Comparación de las modelaciones hidrológicas de la subcuenca de Río Piedras</b>	<b>102</b>
<b>Cuadro 28. Aforos a la altura de la captación de Metroagua</b>	<b>103</b>
<b>Cuadro 29. Caudal disponible del Río Piedras a la altura de la captación de Metroagua</b>	<b>105</b>
<b>Cuadro 30. Caudal disponible del Río Piedras a la altura de la captación del acueducto distrital de ser concedidos los aumentos de caudales en la captación</b>	<b>107</b>

## LISTA DE IMÁGENES

	<b>Pág.</b>
<b>Imagen 1. Cerros bajos de la Sierra Nevada de Santa Marta que hacen parte de la cuenca del río Piedras</b>	<b>10</b>
<b>Imagen 2. Afloramientos rocosos del cauce del Río Piedras</b>	<b>11</b>
<b>Imagen 3. Afloramientos rocosos del cauce del Río Piedras</b>	<b>12</b>
<b>Imagen 4. Deslizamiento en la cuenca del río Piedras</b>	<b>15</b>
<b>Imagen 5. Avistamientos de zonas erosionadas así como de zonas con abundante cobertura vegetal en la cuenca del río Piedras</b>	<b>16</b>

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
<b>Anexo 1. Valor total mensual de precipitación (mm), estación San Lorenzo</b>	<b>115</b>
<b>Anexo 2. Valor máximo mensual de precipitación (mm), estación San Lorenzo</b>	<b>116</b>
<b>Anexo 3. Valor total mensual de precipitación (mm), estación Guachaca</b>	<b>117</b>
<b>Anexo 4. Valor total mensual de precipitación (mm), estación Parque Tayrona</b>	<b>118</b>
<b>Anexo 5. Valor total mensual de precipitación (mm), estación Parque Tayrona</b>	<b>119</b>
<b>Correlacionada</b>	
<b>Anexo 6. Valor máximo mensual anual de precipitación, estación Parque Tayrona y su correlación</b>	<b>120</b>
<b>Anexo 7. Valores de <math>K_T</math> según la función de distribución de probabilidad.</b>	<b>121</b>
<b>Distribución Normal</b>	
<b>Anexo 8. Valores de <math>\chi^2</math> de la distribución ji-cuadrado con n grados de libertad.</b>	<b>122</b>
<b>Distribución Pearson y Log-Pearson tipo III.</b>	
<b>Anexo 9. Factores de frecuencia <math>K_T</math>. Distribución Gumbel</b>	<b>123</b>
<b>Anexo 10. Precipitaciones calculadas con las diferentes distribuciones de probabilidad para cada período de retorno en la estación Parque Tayrona</b>	<b>124</b>
<b>Correlacionada</b>	
<b>Anexo 11. Precipitaciones calculadas con las diferentes distribuciones de probabilidad para cada período de retorno en la estación San Lorenzo</b>	<b>124</b>
<b>Anexo 12. Resumen de la prueba de bondad de ajuste <math>\chi^2</math> para la estación Parque Tayrona Correlacionada</b>	<b>125</b>
<b>Anexo 13. Resumen de la prueba de bondad de ajuste <math>\chi^2</math> para la Estación San Lorenzo</b>	<b>126</b>
<b>Anexo 14. Resumen de la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov para la estación Parque Tayrona Correlacionada</b>	<b>127</b>
<b>Anexo 15. Resumen de la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov para la Estación San Lorenzo</b>	<b>128</b>
<b>Anexo 16. Número de curva de escorrentía para tierras agrícolas cultivadas</b>	<b>129</b>

<b>Anexo 17. Números de curva de escorrentía correspondientes a tres condiciones de humedad antecedente CHA</b>	<b>130</b>
<b>Anexo 18. Cobertura vegetal de la Cuenca del Río Piedras</b>	<b>130</b>
<b>Anexo 19. Factores de corrección de evapotranspiración potencial mensual <math>K_a</math>, dados por el método de Thorntwaite, para ajustarlo al número de días del mes y a la duración del brillo diario, en los varios meses del año y en latitudes entre 15°N y 37°S</b>	<b>132</b>
<b>Anexo 20. Temperatura media mensual multianual (°C), estaciones Parque Tayrona y San Lorenzo</b>	<b>133</b>
<b>Anexo 21. Valores de los parámetros B y n para determinar el Hidrograma Unitario Sintético de Williams y Hann</b>	<b>133</b>

## **INTRODUCCIÓN**

El agua es un elemento indispensable tanto para el hombre como para el desarrollo de la agricultura y la industria; mas se debe tener en cuenta que los recursos hídricos son renovables pero limitados debido al incremento de la demanda y a la disminución de la disponibilidad del recurso hídrico por el deterioro de la calidad de las aguas.

El Río Piedras es un río muy importante porque de él se deriva parte del agua que abastece a la población Samaria. Nace en predios y áreas adyacentes a la Finca Tolima, a una altura de 2.309 m.s.n.m. La cuenca en su parte más alta presenta límites naturales consistentes en dos (2) filos: Un filo Nororiental, con sentido de Sur a Norte con dirección al Mar Caribe, donde se encuentran la Finca Tolima y otro punto denominado Providencia; un segundo filo Noroccidental, con sentido de Sur a Norte con respecto al Mar Caribe, donde se encuentran los sitios Onaca y, mucho más cerca del mar, Girocasaca.

La cuenca del río tiene un área de 157 Km<sup>2</sup> aproximadamente y su desembocadura ocurre en el Mar Caribe a la altura del sitio conocido como los Naranjos. Los caudales variables disponibles del Río Piedras están supeditados al régimen climático como consecuencias de las altas, bajas y/o escasas precipitaciones que se suceden en la parte alta y en el área de influencia de la mencionada cuenca, donde se destacan un conjunto de afluentes en los que sobresale la quebrada La Lisa.

Debido a que se desea caracterizar hidrológicamente la cuenca del Río Piedras con el fin de evaluar su disponibilidad como fuente hídrica para mejorar la oferta de abastecimiento de la ciudad de Santa Marta D.T.C.H., se hace necesario determinar una subcuenca del mismo a la altura del punto de captación del acueducto distrital para así estimar el comportamiento de la parte alta de la macrocuenca del Río Piedras ya que ésta es la que provee del preciado líquido a los habitantes de la ciudad de Santa Marta.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar hidrológicamente la cuenca del Río Piedras y evaluar su disponibilidad como fuente hídrica para mejorar la oferta de abastecimiento de la ciudad de Santa Marta D.T.C.H.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Disponer de una información climatológica, hidrológica e hidráulica del Río Piedras.
- Caracterizar hidrológicamente la cuenca del Río Piedras.
- Evaluar la disponibilidad del recurso hídrico en las diferentes épocas del año.
- Evaluar parámetros hidrológicos e hidráulicos mediante la utilización del software especializado desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, llamado Hidrosig Java, el cual se basa en la implementación de modelos digitales de terreno MDT.
- Establecer los caudales y volúmenes de agua disponibles para las diferentes épocas del año como alternativa para aumentar la oferta de abastecimiento de agua para el Distrito, teniendo siempre presente el caudal ecológico o volumen mínimo de agua necesario para la conservación y preservación del entorno fauna y flora.



## 2. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

Con el fin de recopilar la información existente sobre el Río Piedras se visitaron diferentes entidades como la Corporación Autónoma regional del Magdalena “CORPAMAG”, el Departamento Administrativo Distrital del Medio Ambiente “DADMA”, Planeación Distrital, Planeación Departamental, el Instituto Agustín Codazzi “IGAC” y el Instituto Hidrológico, Metereológico y del Medio Ambiente “IDEAM”, pero en la mayoría de los casos el intento fue fallido ya que no existe mucha información disponible, e inclusive, cuando se solicitó dejar constancia de dicha inexistencia, no fue posible encontrar alguien que se responsabilizara.

Entre los pocos datos recopilados se encuentran los existentes en el IDEAM y los planos del IGAC, los pocos estudios que se han realizado son ambientales, cuyo contenido sólo presenta una visión general del entorno biofísico de la cuenca. Tanto los datos como los estudios servirán de referencia para la calibración del modelo hidrológico obtenido como producto del presente proyecto.

Cabe aclarar que los estudios existentes sólo dan ideas de lo concerniente a la constitución de la cuenca, pero no pueden ser utilizados para su caracterización y evaluación hidrológica o hidráulica, y no permiten conocer el comportamiento real de la cuenca.

Los datos recopilados que sirvieron como información básica son los siguientes:

- Planchas 12-III-A, 12-III-B, 12-III-C, 12-I-C Y 12-III-D, a escala 1:25.000 con curvas de nivel a cada cincuenta (50) metros del IGAC.
- Valor total mensual de precipitación, estaciones San Lorenzo, Parque Tayrona y Guachaca, IDEAM.

- Valor máximo mensual de precipitación, estaciones San Lorenzo y Parque Tayrona, IDEAM.
- Valor medio mensual de temperatura de las estaciones Parque Tayrona y San Lorenzo, IDEAM.
- Valores medios y máximos de caudales de la estación la Revuelta, IDEAM.
- Aforos del Río Piedras y del canal de conducción del acueducto distrital a la altura de la captación.
- Generalidades de la Cuenca del Río Piedras. UMATA

### 3. METODOLOGÍA

Para poder realizar la caracterización hidrológica de la cuenca del río piedras y evaluar la disponibilidad de se recurso hídrico, se llevó a cabo la siguiente metodología:

Inicialmente se ingresaron los planos obtenidos en el IGAC utilizando un scanner tipo HP Scanjet serie 2300c, luego se procedió a digitalizar la cartografía base sobre la cual se midieron las diferentes características geométricas de la cuenca y la subcuenca, para esto fue necesario emplear el software AUTOCAD 2004.

Se hizo una delimitación espacio temporal y geográfica de la cuenca hidrográfica, además, con la ayuda de la poca información adicional recopilada se hizo una descripción acerca de la fisiografía, geología y geomorfología, el clima, la hidrografía, la vegetación, los tipos de suelos y el uso actual del área de la cuenca del río Piedras. Seguidamente, usando los planos ya digitalizados, se determinaron las principales características morfológicas de la cuenca como son forma, sistema de drenaje y características del relieve, todas estas particularidades sirvieron para tener una idea básica inicial de la respuesta de la cuenca ante un eventual suceso de precipitación máxima.

Utilizando ahora los datos de las series históricas de los registros meteorológicos adquiridos en el IDEAM se realizó la evaluación hidrometeorológica de la cuenca, para lo cual fue necesario hacer un análisis estadístico de los datos de precipitación ya que habían datos faltantes que debieron ser obtenidos mediante correlaciones para poder determinar la precipitación media por medio de la teoría de los polígonos de Thiessen y la de las isoyetas, donde fue necesario emplear el programa SURFER 7. Para calcular las curvas intensidad-duración-frecuencia IDF se hizo un análisis estadístico de los eventos máximos de precipitación registrados en cada estación hallando las diferentes funciones de probabilidad (Normal, Pearson tipo III, Log-Pearson tipo III y Gumbel), luego se escogió la función que

representaba de mejor manera el comportamiento de los datos de cada estación utilizando las pruebas de bondad del ajuste de  $\chi^2$  y Kolmogorov-Smirnov.

Para analizar la infiltración en la cuenca se utilizó la clasificación hidrológica de los suelos según la Soil Conservation Service, la cual tiene en cuenta la clasificación hidrológica de los suelos, la condición de humedad antecedente y el número de curva de escurrimiento CN, para la estimación de la escurrimiento directa según retención potencial máxima del suelo de la cuenca.

Luego se utilizó el método de Thornthwaite para determinar la evapotranspiración potencial de la cuenca del Río Piedras empleando la temperatura media mensual de las estaciones Parque Tayrona y San Lorenzo. Después se procedió a establecer las hidrógrafas unitarias usando el Hidrograma Unitario Sintético de Williams y Hann.

Para realizar la modelación hidrológica se utilizó el modelo denominado abcd, que es un modelo no lineal que toma como datos de entrada la precipitación y la evapotranspiración potencial, y da como resultado el flujo en el cauce. Los parámetros **a**, **d** y **c** son independientes y se estiman a criterio personal según el comportamiento de cada cuenca, mientras que **b** se calcula teniendo en cuenta aspectos como la evapotranspiración y el agua disponible.

Ahora sólo resta alimentar al programa HIDROSIG con la información necesaria que le permita calcular los caudales del Río Piedras, para esto es preciso crear las variables geomorfológicas a hidrológicas; empezando por el modelo digital del terreno. Para esto se transformó el archivo de digitalización de las curvas de nivel en AUTOCAD en un archivo con extensión dxf (drawing interchange format), luego, usando el programa DXF2XYZ 2.0, se pasó el archivo de \*.dxf a \*.xyz con lo cual fue posible crear la grilla en el programa SURFER 7 convirtiendo inicialmente el archivo de datos \*.xyz en una hoja de cálculo \*.xls. Teniendo la hoja de cálculo en la base de datos del SURFER se creó la grilla (\*.grd). Para que el HIDROSIG reconozca correctamente la grilla de datos ésta debe guardarse en SURFER como archivo tipo ASCII (American Standard Code for Information Interchange) \*.grd. Posteriormente se importó el archivo SURFER GRD desde HIDROSIG, para que el programa realice los cálculos geomorfológicos es necesario utilizar la Herramienta de Proyección que

transforma las coordenadas planas a latitud y longitud, utilizando como coordenadas de origen el datum Bogotá. Finalmente se procesó el MDT de modo que se obtuvo la geomorfología de la cuenca del Río Piedras en HIDROSIG. Para ingresar las variables hidrológicas de precipitación, evapotranspiración y escorrentía se realizó el mismo proceso, obviamente alimentado el programa esta vez con la información de las estaciones meteorológicas.

De este modo pues, se obtuvieron los resultados esperados de caudales en la cuenca del Río Piedras, tanto los procesados por el programa como los calculados manualmente.

## **4. GENERALIDADES DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA**

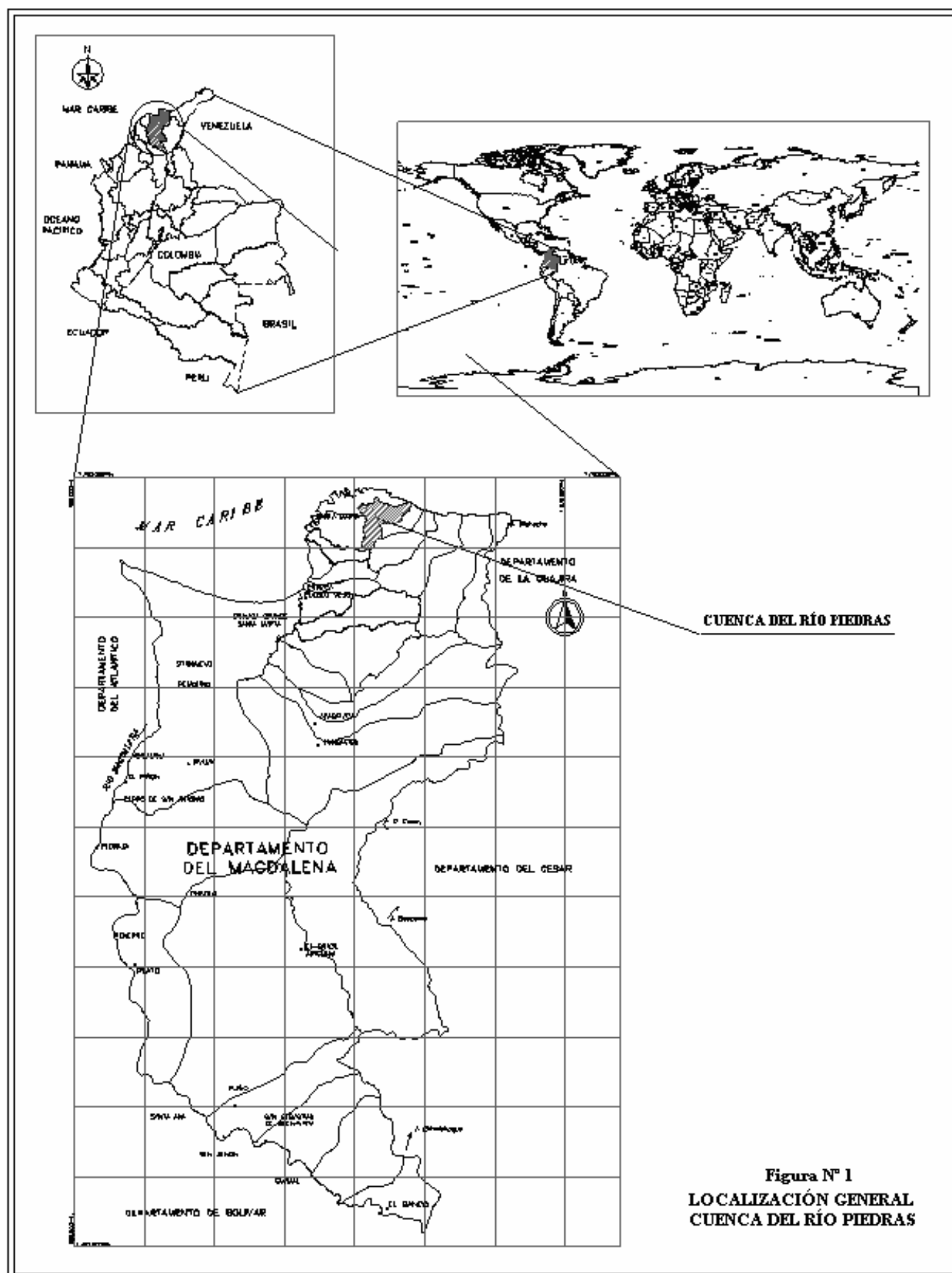
### **4.1 DELIMITACIONES DEL ESPACIO TEMPORAL Y GEOGRÁFICO**

La Cuenca alta del Río Piedras, hace parte de la vertiente norte o macrocuenca del Mar Caribe, se encuentra enmarcada entre las coordenadas 12°11'29,1" de latitud Norte y 71°57'32,6" de longitud Oeste. Referenciada con respecto al Datum Bogotá 1.000.000N – 1.000.000E el río se extiende a partir de las coordenadas 1.004.601,81E, 1.724.046,00N hasta su desembocadura, cuyas coordenadas son 1.740.985,16N, 1.019.933,96E.

El Río Piedras tiene una longitud de 37,65 Km y la cuenca tiene una superficie de 157.31 Km<sup>2</sup>, y se encuentra localizada dentro del área del Distrito de Santa Marta. La subcuenca de la parte alta está delimitada al oeste por la Serranía de la Horqueta y al este por la Cuchilla de Piedras Blancas, terminando al norte sobre el cauce del Río Piedras a la altura de 610 m.s.n.m. en la coordenada 1.731.431,79N, 1.004.502,51E, contando con una longitud del río de 10.5 Km y un área de 29.4 Km<sup>2</sup>. Ver Figura 1, Localización general.

### **4.2 FISIOGRAFÍA**

La cuenca está conformada en gran parte por los cerros bajos de la Sierra Nevada de Santa Marta y en su parte montañosa presenta laderas empinadas que ocasionan cambios bruscos de dirección y un sistema complejo de drenaje con características dendríticas. El relieve del área en estudio es de topografía quebrada y variable, predominando en su orden: relieve muy escarpado, escarpado, quebrado y ondulado.





**Imagen 1. Cerros bajos de la Sierra Nevada de Santa Marta que hacen parte de la cuenca del río Piedras.**

**Fuente: CORPAMAG**

### **4.3 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA**

La Sierra Nevada de Santa Marta se encuentra principalmente conformada por rocas precámbricas; período en el cual el basamento se encontraba emergido, por esto la geología de la zona en estudio se encuentra relacionada directamente con esta época. En el período paleozoico ocurrió un levantamiento del continente y como consecuencia de esto, hubo una regresión marina depositándose de esta forma sedimentos calcáreos en la región.

La intrusión del batolito y cuarzo característicos de la región de Santa Marta tuvo lugar entre el Jura-Triasico y el Triasico-Tardío. Durante el período Cretáceo los Andes Colombianos comienzan a sufrir un hundimiento y los estratos continentales de Jurasico sufrieron fuertes erosiones. La Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía de Perijá se separaron en el Cretáceo-Tardío. En el período Cenozoico los sedimentos Cretáceos fueron metamorfeados a esquistos verdes y toda esta orogenia finalizó con la intrusión de los batolitos cuarzodioríticos de Santa Marta.



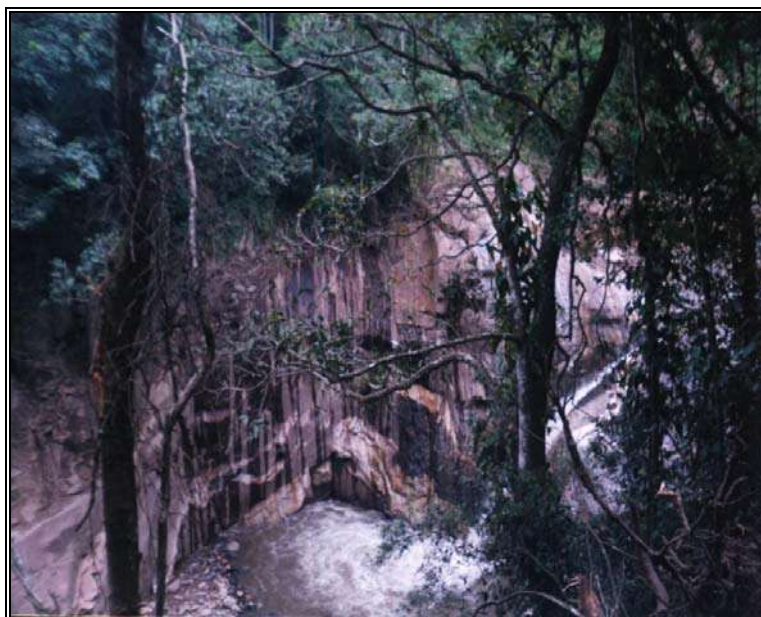
En el Mioceno la Sierra Nevada de Santa Marta está asociada a mayor inestabilidad produciéndose la separación parcial de ésta con la Cordillera Central a través de la falla Santa Marta-Bucaramanga unos 120 Km. Durante el desarrollo del Holoceno se dieron la erosión, sedimentación y acarreo de material no compacto, por la formación de sabanas y terrazas en los valles y las playas de la costa de Mar Caribe. Los periodos Glaciales e Interglaciares marcaron cambios en la vegetación y clima de la Sierra Nevada de Santa Marta.



**Imagen 2. Afloramientos rocosos de la cuenca del Río Piedras.**

**Fuente: CORPAMAG**

El afloramiento rocoso a todo lo largo de la cuenca del Río Piedras permite afirmar que ésta cuenca cuenta con suelos superficiales de poca profundidad efectiva, y que las rocas que da origen a su formación son de material rocoso Ígneo o Metamórfico; con amplios estados de meteorización por ocasión de los estados ambientales como son temperatura, clima, altas precipitaciones y la acción que ejercen las plantas y microorganismos sobre la roca para dar como resultado la descomposición de la misma.



**Imagen 3. Afloramientos rocosos del cauca del Río Piedras.**

**Fuente: CORPAMAG**

#### **4.4 CLIMA**

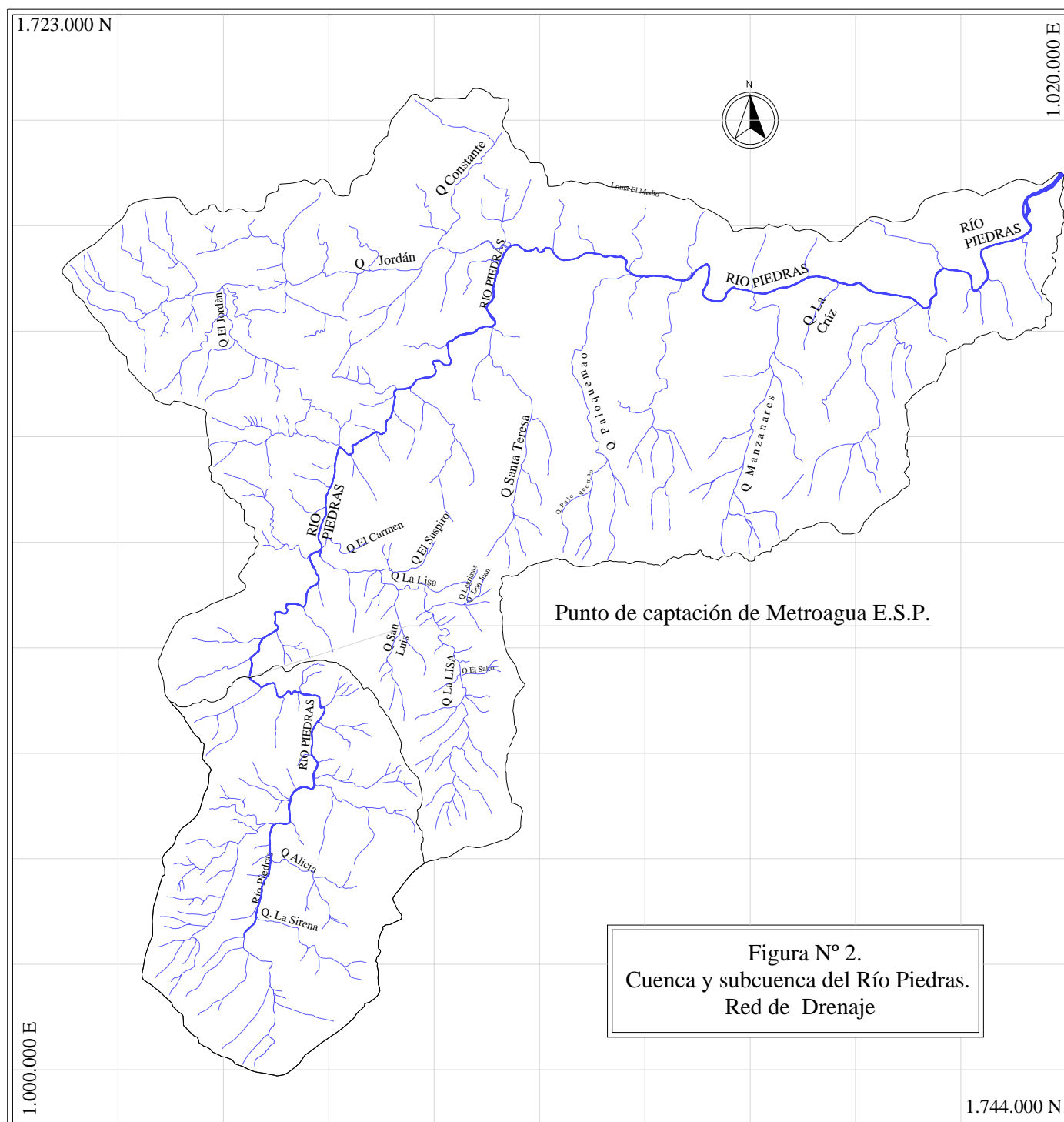
El macizo montañoso, al ascender hasta las cumbres nevadas, ofrece un amplio rango de temperaturas, comprendido entre las ardientes de la costa y las extremadamente frías de sus cimas. Los vientos alisios y otras corrientes de aire del caribe, al penetrar en el interior, acumulan las nubes en las vertientes y provocan elevadas precipitaciones, a su vez, crean zonas secas en las partes bajas por transporte de humedad. Si debajo de los 200 m.s.n.m. prevalece un clima seco, arriba de este nivel las condiciones reinantes durante todo el año son de humedad. La cuenca del Río Piedras se encuentra entre 0 m.s.n.m. y 2.550 m.s.n.m., y la subcuenca desde la altura de 610 m.s.n.m., en la franja de los 1.000 a los 2.500 m.s.n.m. la precipitación media anual oscila entre los 2.000mm y los 4.000mm, y la temperatura entre los 24 grados centígrados y los 17 grados centígrados. De los 2.500 a los 3.100 m.s.n.m. el clima es de tierra fría y páramo bajo. Por encima de los 4.700 m.s.n.m. aparecen las nieves perpetuas de la Sierra Nevada de Santa Marta.

## 4.5 HIDROGRAFÍA

La cuenca del Río Piedras es de forma regular, con un ancho promedio de cinco (5) kilómetros en su parte baja y alta, alcanzado unos diez (10) kilómetros en la parte media y una longitud promedio de 38 kilómetros. Limita al norte y noroeste con microcuencas de quebradas como Playa Brava, El Cabo, San Lucas y Cinto, que vierten sus aguas al Mar Caribe; al sur con la cuchilla de San Lorenzo y las cuencas de los ríos Gaira y Guachaca. Al sureste limita con la cuenca del río Mendihuaca y al oeste con la cuenca del río Manzanares, con la región Las Tinajas y la cuenca de la Quebrada la Concha. Su principal afluente es la quebrada La Lisa, que nace en la parte media-alta de la cuenca aproximadamente a unos 1.700 m.s.n.m., entre la Cuchilla de Piedras Blancas, el Cerro Medellín y el Cerro Boquerón, y entrega sus aguas al Río Piedras a la altura de 400 m.s.n.m cerca del sitio El Carmen, de ahí en adelante el río disminuye notablemente su pendiente. Además el Río Piedras es alimentado por una red dendrítica de pequeños tributarios que conforman la espesa red de drenaje de la cuenca, que se puede observar en la Figura 2.

## 4.6 VEGETACIÓN

De abajo hacia arriba, la primera formación vegetal que se encuentra es el monte espinoso, en el extremo: cactus y arbustos como trupillos, tunas, bijas, guamachos y piñuelas, especies que crecen bajo un sol inclemente y la acción de vientos marinos. El bosque seco que emerge a continuación, con marañones y almendros, palmas y guamos, es vestigio apenas de aquella masa boscosa que cubría los suelos. Encima de esta franja surge magnífico el bosque húmedo tropical hasta una altura de 1.000 m.s.n.m. en la parte alta de la cuenca, el bosque desarrolla árboles de alturas elevadas (alrededor de 40 m) y de diversas especies como ceibas, caracolís, macondos, higuerones, zambo-cedros, cedros, guácimos, algarrobos, laureles, cauchos y jobos. Abundan las lianas (tripa de pollo, bejuco de agua, ojo de buey, bejuco cadena), muchas variedades de palmas, helechos y, en las ramazones, florecen coloridos los quiches, o se desarrolla poderoso el abrazapalos.



Entre los 1.000 m.s.n.m. y los 2.000 m.s.n.m. aproximadamente, aparecen los bosques que corresponden a la franja conocida como "cinturón cafetero" del país; son los bosques premontanos, húmedo y muy húmedo, donde la selva cubre frondosa la cuenca de los ríos que descienden vertiginosos por entre lomas de escarpado relieve y encajonados valles. La temperatura media de 24°C a 18°C y las fuertes y constantes lluvias favorecen la profusión vegetal de árboles como nogales, guayacán, aguacate y aguacatillo, cambulos, amarillos, guamos de río, chupos y majaguitos; en helechos hay toda una variedad, incluidos los arborescentes y los platanillos florecidos, las bromeliáceas espinosas, las cortantes ciperáceas y las cariacidas o zarzamoras, dan a la selva un aspecto de jardín con el conjunto de las epifitas y los cortinajes de las lianas.

#### 4.7 SUELOS Y USO ACTUAL

Los suelos de la cuenca, al igual que los demás suelos del macizo Montañoso de la Sierra Nevada de Santa Marta, son de pH ácido; hecho que se puede comprobar con la alta población de helechos de variables especies, formas y tamaño, entre otros los del genero *Polystichum*, *Adiantum*, *Monanthes*, *Sierra*, *Praemorsum*. Son plantas silvestres de ornamentación natural, plantas perennes, herbáceas, y pertenecen a la clase de las *Filicales* y *Creiptógamas* (plantas sin flores).



Imagen 4. Deslizamiento en la cuenca del río Piedras.

Fuente: CORPAMAG

Generalmente son tierras en extremo secas, abruptas, inclinadas, pedregosas, arenosas, húmedas o bien están gravemente erosionadas. Los suelos son originados a partir de materiales Ígneos-Metamórficos. Las principales limitantes que señala el IGAC (1995) para su uso son: profundidad superficial a moderadamente profunda, abundante afloramiento rocoso, pendientes escarpadas y muy escarpadas, alta susceptibilidad a la erosión hídrica y a los movimientos en masa.

La cobertura vegetal que debería existir, según la clasificación por altitud zonal y ecológica no se relaciona con la existente en algunos sectores debido a la intervención antrópica, por ejemplo; la quebrada La Lisa; en su parte media alta y en la ronda hidráulica está cubierta con pastos naturales y directamente relacionado con el medio de esa unidad ambiental.

Existen grandes sectores o áreas que por sus condiciones de topografía en escarpe, son susceptibles a la erosión hídrica debido a su poca cobertura vegetal, las cuales no son ocupadas por actividades antrópicas; mientras que otros sectores con igual o mayor proporción están dotados de una cobertura vegetal densa y espesa, las cuales se encuentran repletas de bosques primarios.



**Imagen 5. Avistamientos de zonas erosionadas así como de zonas con abundante cobertura vegetal en la cuenca del río Piedras.**

**Fuente: CORPAMAG**



Es importante reconocer que la cobertura del suelo, regula y protege la superficie de la erosión; evitando el transporte de materiales, se obtiene mayor estabilidad en la superficie, mayor acumulación de agua, tanto en el suelo como en la vegetación, dando lugar al aporte de detritos orgánicos y minerales de los suelos desarrollados y de alto contenido de materia orgánica.

La actividad agrícola que mayor se destaca es el cultivo del café, el cual es el principal generador de ingreso para las familias y con el que se consigue la mayor generación de empleos. Es un cultivo con poca tecnificación recibiendo en el mercado Internacional y nacional el nombre de café orgánico. En ésta actividad se destaca el uso de las variedades: Caturra, Arábico o pajarito, variedad Colombia, San Fernando y Borbón entre otras.

El segundo sistema de producción son los frutales y por ultimo los cultivos de Pancoger (Maíz, Yuca, Malanga, guineo, plátano y caña), este ultimo hace parte de una actividad para el autoconsumo. Otras áreas se dedican al sistema de producción pecuario; con ganadería bovina con doble propósito (carne-leche), la cual se desarrolla de manera extensiva con el pastoreo de diferentes pastos naturales y artificiales entre otros el Kikuyo (*Pennisetum Clandestinum*) y el Jaragua (*Hypharhenia Ruia*). Otras áreas están siendo subutilizadas con rastrojos que son bastantes altos y espesos. En la cuenca se encuentran también bosques primarios y secundarios, sin embargo esto no quiere decir que el estado actual de la cuenca sea el óptimo, es necesario anotar que existe una recuperación natural de muchas áreas desde hace más de 20 años.

En términos generales las características físicas de los suelos pertenecientes a esta cuenca presentan graves limitaciones para adelantar actividades agropecuarias. Pareciera ser que sólo factores como la altura sobre el nivel del mar y el clima hacen posible que, en los actuales momentos y no por mucho tiempo, se obtengan resultados aceptables en materia agrícola y ganadera, ya que técnicamente el uso actual del suelo de la cuenca no es el más adecuado. Como ya se mencionó, los suelos del área de la cuenca del Río Piedras, se caracterizan por tener un relieve escarpado y muy escarpado y por ser susceptibles a la erosión hídrica severa y con baja permeabilidad.

Un posible uso potencial de estos suelos es la explotación sostenible de los bosques, destinándose a la conservación y recuperación de las áreas boscosas, haciendo énfasis en aquellos sitios en donde se localizan los nacaderos y afluentes que conforman el cauce principal.



## 5. CARACTERÍSTICAS MORFOLOGICAS DE LA CUENCA Y LA SUBCUENCA

En busca de evaluar la disponibilidad como fuente hídrica del río piedras para, entre otras acciones, considerar la opción de mejorar la oferta de abastecimiento, se requiere caracterizar hidrológicamente la cuenca del Río Piedras y examinar de paso el punto de captación del acueducto distrital, con coordenadas 1.730.974,58N, 1.002.994,75E.

Además de la cuenca del Río Piedras se analizará el sector alto de la misma en el tramo que influye directamente sobre el punto donde se encuentra la captación del acueducto distrital. En la Figura 2 se presenta la subcuenca del punto de captación ubicada en la cuenca del Río Piedras.

Para poder caracterizar hidrológicamente la cuenca del Río Piedras se hizo necesario digitalizar las planchas 12-III-A, 12-III-B, 12-III-C, 12-I-C Y 12-III-D, a escala 1:25.000 con curvas de nivel a cada cincuenta (50) metros del IGAC. En la Figura 3 se presentan las curvas de nivel de la cuenca del Río Piedras, lo que muestra que desde el punto de vista de su desembocadura el tipo de cuenca que se tiene es una cuenca Exorreica, donde el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está desemboca directamente en el mar.

Las características físicas de la cuenca son incidentes en la respuesta hidrológica de una hoya y dependientes de la morfología (forma, relieve, red de drenaje, etc.), los tipos de suelos, la capa vegetal, la geología, etc. Parámetros todos que serán definidos para la cuenca del Río Piedras.



## 5.1 FORMA DE LA CUENCA

Esta característica es importante pues se relaciona con el tiempo de concentración, el cual es el tiempo necesario, desde el inicio de la precipitación, para que toda la hoya contribuya a la sección de la corriente en estudio, o, en otras palabras, el tiempo que toma desde los límites más extremos de la hoya hasta llegar a la salida de misma.

**5.1.1 Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad (Kc):** Es la relación entre el perímetro de la hoya y la longitud de la circunferencia de un círculo de área igual a la de la hoya.

$$Kc = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$$

donde:

P: perímetro de la hoya, en Km

A: área de drenaje de la hoya, en Km<sup>2</sup>

Cuanto más irregular sea la hoya mayor será su coeficiente de compacidad. Una hoya circular posee el coeficiente mínimo, igual a la unidad. Hay mayor tendencia a las crecientes a medida que este número sea próximo a la unidad. Cuando el coeficiente de compacidad toma valores entre 1,0 y 1,25 la cuenca es casi redonda u ovalo-redonda.

Parámetros evaluados	Cuenca	Subcuenca
Área	157.31 Km <sup>2</sup>	29.39 Km <sup>2</sup>
Perímetro	75.58 Km	23.53 Km
Índice de Gravelius (Kc)	<b>1.69</b>	<b>1.22</b>

Para la cuenca el índice de Gravelius tiene un valor que indica que ésta es poco susceptible a las crecientes, mientras que en la subcuenca el valor obtenido evidencia que el drenaje de la misma tiene una tendencia considerable a las crecientes ya que tal valor es cercano a la unidad y se encuentra dentro de los parámetros de clasificación de cuenca casi ovalo-redonda.

**5.1.2 Factor de Forma (Kf):** Es la relación entre el ancho medio y la longitud axial de la hoya. Una hoya con factor de forma bajo está menos sujeta a crecientes que otra del mismo tamaño pero con mayor factor de forma.

$$Kf = \frac{A}{L^2}$$

donde:

A: área de drenaje, en Km<sup>2</sup>

L: longitud axial de la hoya, en Km

Parámetros evaluados	Cuenca	Subcuenca
Área	157.31 Km <sup>2</sup>	29.39 Km <sup>2</sup>
Longitud axial	37.74 Km	10.55 Km
Factor de forma (Kf)	<b>0.11</b>	<b>0.26</b>

Al igual que el índice de Gravelius, el bajo valor del factor de forma de la cuenca indica que ésta es poco susceptible a las crecientes, mientras que la subcuenca es más propensa a sufrirlas.

**5.1.3 Relaciones del área:** Las observaciones en un buen número de cauces alrededor del mundo parecen comprobar la existencia de una relación de la forma:

$$L = 1,27 A^{0.6}$$

donde L es la longitud del canal principal en kilómetros y A es el área de drenaje en kilómetros cuadrados. El exponente varía generalmente entre 0,6 y 0,7, y sugiere que a medida que las cuencas se hacen más extensas también tienden a ser más alargadas. Es importante anotar que el coeficiente de la ecuación es igual a 1,4 cuando las dimensiones se toman en millas.

Parámetros evaluados	Cuenca	Subcuenca
Área	157.31 Km <sup>2</sup>	29.39 Km <sup>2</sup>
Longitud del cauce principal	37.65 Km	10.46 Km
Valor del exponente	0.670	0.624
Longitud del cauce principal calculada	<b>37.65 Km</b>	<b>10.46 Km</b>

Una vez más se confirma la regularidad de la forma, tanto de la cuenca como de la subcuenca, puesto que al variar el exponente entre 0,6 y 0,7 se cumple la relación de área en ambas cuencas.

## 5.2 SISTEMA DE DRENAJE

Está constituido por la corriente principal y las corrientes tributarias que son de aportación al tramo principal, las cuales son de gran importancia ya que entre más corrientes tributarias tenga una cuenca más rápida será su respuesta a la precipitación.

**5.2.1 Número de Orden de la Corriente (N):** Representa una medida de la ramificación del cauce principal en una cuenca hidrográfica. Horton sugirió la clasificación de cauces de acuerdo al número de orden de un río. Un río de primer orden es un tributario pequeño sin ramificaciones. Un río de segundo orden es uno que posee únicamente ramificaciones de primer orden. Un río de tercer orden es uno que posee solamente ramificaciones de primero y segundo orden. El orden de una cuenca hidrográfica está dado por el número de orden del cauce principal.

Luego del análisis de Horton del Río Piedras se determinó que éste es de orden 5, lo cual quiere decir que tiene una considerable ramificación.

**5.2.2 Densidad de drenaje (Dd):** Es la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la hoya y su área total. Una densidad alta refleja una cuenca muy bien drenada que debería

responder relativamente rápido al influjo de la precipitación, una cuenca con baja densidad refleja un área pobremente drenada con respuesta hidrológica muy lenta.

$$Dd = \frac{L}{A}, \quad \text{en } \frac{\text{Km}}{\text{Km}^2}$$

donde:

L: longitud total de las corrientes de agua, en Km

A: área total de la hoya, en Km<sup>2</sup>

Dd usualmente toma valores entre 0,5 Km/Km<sup>2</sup> para hoyas con drenaje pobre hasta 3,5 Km/Km<sup>2</sup> para cuencas excepcionalmente bien drenadas.

Parámetros evaluados	Cuenca	Subcuenca
Área	157.31 Km <sup>2</sup>	29.39 Km <sup>2</sup>
Longitud total de las corrientes de agua	329.37 Km	71.27 Km
Densidad de drenaje	<b>2.09 Km/Km<sup>2</sup></b>	<b>2.42 Km/Km<sup>2</sup></b>

Como se puede observar en los valores obtenidos de la densidad de drenaje, tanto la cuenca del Río Piedras como la subcuenca, cuentan con un buen drenaje y una respuesta rápida a la influencia de la precipitación ya que cuentan con suficientes tributarios que transportan rápidamente el agua.

La leve diferencia de densidad de drenaje en ambas cuencas indica que en la subcuenca, que es la que tiene valor mayor, se encuentran concentradas las áreas con suelos más erosionables o relativamente impermeables, y con pendientes fuertes. Esto es apenas de esperarse ya que se debe recordar que la subcuenca hace parte de la cuenca alta del Río Piedras.

**5.2.3 Longitud de flujo de superficie (Lo):** La longitud promedio del flujo de superficie puede obtenerse de manera aproximada por medio de la siguiente ecuación

$$\overline{Lo} = \frac{1}{2Dd}$$

donde:

Dd: densidad de drenaje

Esta será la distancia media en que el agua de lluvia tendría que escurrir sobre los terrenos de la hoya, en caso de que la escorrentía se diese en línea recta desde donde la lluvia cayó hasta el punto más próximo al lecho de una corriente cualquiera de la hoya. Entre menor sea la longitud de flujo de superficie mejor drenaje tendrá la cuenca.

Parámetros evaluados	Cuenca	Subcuenca
Densidad de drenaje	2.09 Km/Km <sup>2</sup>	2.42 Km/Km <sup>2</sup>
Longitud de flujo de superficie	<b>0.24 Km</b>	<b>0.21 Km</b>

Ambas cuencas presentan un buen drenaje y respuesta rápida a la influencia de la precipitación ya que los valores obtenidos para la distancia media que recorre el agua de lluvia es relativamente corta en ambos casos; varía entre 210 y 240 metros.

**5.2.4 Sinuosidad de las corrientes de agua (S):** Es la relación entre la longitud del río principal medida a lo largo de su cauce y la longitud del valle del río principal medida en línea curva o recta. Da una medida de la velocidad de la escorrentía del agua a lo largo de la corriente. Un valor de S menor o igual a 1,25 indica una baja sinuosidad.

$$S = \frac{L}{L_t}$$

donde:

L: longitud del río principal medida a lo largo de su cauce, en Km

Lt: longitud del valle del río principal medida en línea curva o recta, en Km

Parámetros evaluados	Cuenca	Subcuenca
Longitud del cauce principal	37.65 Km	10.46 Km
Longitud del valle de la corriente principal	29.34 Km	8.87 Km
Sinuosidad de las corrientes de agua	<b>1.28</b>	<b>1.18</b>

Indiscutiblemente la subcuenca es poco sinuosa, esto lo confirma el bajo valor de sinuosidad que tiene. La cuenca es ligeramente sinuosa según el valor calculado y de hecho en los planos se puede observar que, sobre todo en la parte baja, tiene algunos tramos levemente meandriiformes.

Esta condición de río con alineamiento “recto” ayuda a una rápida evacuación del agua precipitada sobre la cuenca, por lo tanto se confirma una vez más que el sistema de drenaje de la cuenca es eficiente.

### 5.3 CARACTERÍSTICAS DEL RELIEVE DE LA CUENCA

Las características del relieve de una hoya son muy importantes ya que la topografía de una cuenca puede tener más influencia sobre la respuesta hidrológica que la forma de la misma.

**5.3.1 Pendiente de la cuenca:** Esta característica controla en buena parte la velocidad con que se da la escorrentía superficial afectando el tiempo que lleva el agua de la lluvia en concentrarse en los lechos fluviales que constituyen la red de drenaje de las hoyas.

El método más completo que puede ser usado es el de las cuadrículas asociados a un vector, que consiste en determinar la distribución porcentual de las pendientes de los terrenos por medio de una muestra estadística de las pendientes normales a las curvas de nivel dentro de la cuenca, para lo que se deben seguir los siguientes pasos:

1. Según el número de puntos que se quieran definir (por lo menos 50 puntos), trazar cuadrículas sobre el área de drenaje con espaciado adecuado. Cada uno de los puntos de intersección de dichas cuadrículas define una pendiente del terreno determinada.
2. Trazar la línea de nivel correspondiente a dicho punto, por medio de las líneas de nivel inmediatamente inferior y superior. Dicho paso se ejecuta por interpolación.



3. Trazar una tangente a la línea de nivel por ese punto sobre la proyección horizontal o área plana de la hoya.
4. Trazar una perpendicular a la tangente trazada anteriormente, también sobre la proyección horizontal o área plana de la hoya.
5. Sobre la perpendicular trazada en el punto anterior, trazar un perfil del terreno. Dicho perfil define la pendiente correspondiente al punto en consideración.
6. Teniendo la pendiente de todos los puntos definidos por la cuadrícula, se clasifican dichos valores por intervalos de clase.
7. El número de tales intervalos está en relación con el número  $n$  de puntos obtenidos, pero en general no debe ser menor de un valor comprendido entre 5 y 10. Según la ley de Sturges, el número de intervalos  $K$  de una muestra de tamaño  $n$  es:
$$K = 1 + 3.3 \times \text{Log}.n$$
8. Con un tamaño del intervalo de clase  $C=R/K$ , en donde  $R$  es el rango de la muestra, igual al valor máximo menos el valor mínimo.
9. Con todos los intervalos de clase definidos se hace un análisis de frecuencia para determinar finalmente la pendiente media de la cuenca como sigue:

$$\text{Pendiente.media} = \frac{\sum_{i=1}^K (\#Ocurrencias_i \times \text{Pendiente.media}_i)}{\sum_{i=1}^K \#Ocurrencias_i}$$

Con base en el plano digitalizado de la cuenca del Río Piedras se trazó una cuadrícula con una separación entre líneas de 1.500 m, dando como resultado 59 puntos de intersección ubicados dentro de la cuenca y al seguir el procedimiento explicado anteriormente se obtuvo el siguiente resultado:

**Cuadro 1. Cálculo de la pendiente media de la Cuenca del Río Piedras**

Intervalo de pendiente (m/m)	Pendiente media (m/m)	Frecuencia	Ponderación
0.0150 - 0.1952	0.105	17	1.79
0.1953 - 0.3756	0.285	17	4.85
0.3757 - 0.5559	0.466	9	4.19
0.5560 - 0.7363	0.646	10	6.46
0.7364 - 0.9166	0.826	5	4.13
0.9167 - 1.0970	1.007	0	0.00
1.0971 - 1.2773	1.187	1	1.19
Total		59	22.61

$$N = 59$$

$$\text{Rango} = 1.2$$

$$K = 7$$

$$C = 0.1802$$

$$Pendiente.media = \frac{22.61}{59}$$

La pendiente media de la cuenca es **38.33 %**

Para la subcuenca se trazó una cuadrícula con una separación de 700 metros, dando como resultado 53 puntos de intersección ubicados dentro de la cuenca y al seguir el procedimiento explicado anteriormente se obtuvo el siguiente resultado:

Cuadro 2. Cálculo de la pendiente media de la Subcuenca del Río Piedras

Intervalo de pendiente (m/m)	Pendiente media (m/m)	Frecuencia	Ponderación
0.0900- 0.2375	0.164	2	0.33
0.2376- 0.3852	0.311	4	1.25
0.3853- 0.5328	0.459	10	4.59
0.5329- 0.6804	0.607	14	8.49
0.6805- 0.8280	0.754	10	7.54
0.8281- 0.9757	0.902	9	8.12
0.9758- 1.1233	1.050	4	4.20
Total		53	34.51

$$N = 53$$

$$\text{Rango} = 0.99$$

$$K = 7$$

$$C = 0.1475$$

$$Pendiente.media = \frac{34.51}{53}$$

La pendiente media de la subcuenca es **65.12 %**

Otro método para determinar la pendiente ponderada de una hoya hidrográfica tiene como punto de partida sus curvas de nivel. Es decir que, midiendo la longitud total de todas las curvas de nivel, el área de drenaje y la diferencia consecutiva de cota entre curvas de nivel, se puede hallar la pendiente promedio ponderada de la hoya en estudio, siendo:

$$Pendiente.media = \frac{D \times L_L}{A}$$

donde:

D: diferencia de cotas promedio entre curvas de nivel interpoladas

$L_L$ : longitud total de todas las curvas de nivel en la cuenca

A: área total de la cuenca

Tanto para la cuenca como para la subcuenca la diferencia de cotas entre las curvas de nivel es 50

Parámetros evaluados	Cuenca	Subcuenca
Área	157.31 Km <sup>2</sup>	29.39 Km <sup>2</sup>
Longitud total de todas las curvas de nivel en la cuenca	1,453.81 Km	399,04 Km
Pendiente media	<b>46.50 %</b>	<b>67.63 %</b>

Sabiendo que la pendiente media es uno de los indicadores mas importante del control de la escorrentía superficial en la cuenca y basado en los resultados obtenidos, se puede decir que la cuenca tiene un bajo índice de escorrentía superficial caso contrario ocurre con la subcuenca quien tiene un índice considerable para que se de una buena escorrentía.

**5.3.2 Curva hipsométrica:** Es la representación gráfica del relieve de una cuenca. Representa el estudio de la variación de la elevación de los terrenos de la hoya con referencia al nivel medio del mar. Dicha variación puede ser indicada por medio de un gráfico que muestre el porcentaje de área de drenaje que existe por encima o por debajo de varias elevaciones. El método utilizado para determinar esta curva para la cuenca y la subcuenca del Río Piedras consiste en planimetrar las áreas entre curvas de nivel. Tales áreas se midieron directamente del plano digitalizado en AutoCAD y estos datos se tabularon y procesaron con la ayuda de una hoja de cálculo de Microsoft Excel.

La curva hipsométrica relaciona el valor de la cota, en las ordenadas con el porcentaje de área acumulada en las abscisas. Para su construcción se grafican, con excepción de los valores máximos y mínimos de cota hallados, los valores medios de cota de cada intervalo de clase contra su correspondiente área acumulada. Al valor de la cota mayor encontrada corresponde la cero por ciento del porcentaje de área acumulada. El valor de la cota mínima encontrada corresponde el ciento por ciento del porcentaje de área acumulada.

La curva hipsométrica representa, entonces, el porcentaje de área acumulada igualado o excedido para una cota determinada.

La elevación media de una cuenca se define como la sumatoria de las cotas medias de cada intervalo multiplicada por el área de dicho intervalo dividido entre la sumatoria de las áreas.

$$Elevación\ media = \frac{\sum_{i=1}^n (Cota_{media_i} \times Área_i)}{\sum_{i=1}^n Área_i}$$

En el Cuadro 3 se presentan los datos utilizados para el cálculo de la curva hipsométrica para la cuenca del Río Piedras, que se puede observar en la Figura 4.

**Cuadro 3. Cálculo de la curva hipsométrica de la Cuenca del Río Piedras**

Cotas Intervalo de clase (msnm)	Cota media (msnm)	Área (km <sup>2</sup> )	Área acumulada (km <sup>2</sup> )	% Área	% Área (acumulada)	Cota i x A i
2550			0	0	0	
2550 2500	2525	0.012	0.01	0.0075	0.01	29.6310
2500 2450	2475	0.078	0.09	0.0494	0.06	192.2941
2450 2400	2425	0.163	0.25	0.1037	0.16	395.6907
2400 2350	2375	0.375	0.63	0.2386	0.40	891.3430
2350 2300	2325	0.496	1.12	0.3152	0.71	1152.8077
2300 2250	2275	0.542	1.67	0.3445	1.06	1232.8822
2250 2200	2225	0.512	2.18	0.3252	1.38	1138.1043
2200 2150	2175	0.528	2.71	0.3358	1.72	1148.7943
2150 2100	2125	0.624	3.33	0.3970	2.12	1327.0528
2100 2050	2075	0.592	3.92	0.3761	2.49	1227.6005
2050 2000	2025	0.790	4.71	0.5024	3.00	1600.4448
2000 1950	1975	0.775	5.49	0.4928	3.49	1531.0493
1950 1900	1925	0.844	6.33	0.5368	4.02	1625.6379
1900 1850	1875	0.786	7.12	0.4998	4.52	1474.0849
1850 1800	1825	0.927	8.04	0.5894	5.11	1691.9436
1800 1750	1775	0.925	8.97	0.5880	5.70	1641.7181
1750 1700	1725	1.028	10.00	0.6537	6.36	1773.8667
1700 1650	1675	0.934	10.93	0.5938	6.95	1564.6175
1650 1600	1625	1.035	11.97	0.6578	7.61	1681.5461
1600 1550	1575	1.276	13.24	0.8113	8.42	2010.1164
1550 1500	1525	1.488	14.73	0.9461	9.36	2269.5725
1500 1450	1475	1.515	16.25	0.9632	10.33	2234.8178
1450 1400	1425	1.473	17.72	0.9364	11.26	2099.1199

Cuadro 3 (continuación). Cálculo de la curva hipsométrica de la Cuenca del Río Piedras

Cotas Intervalo de clase (msnm)	Cota media (msnm)	Área (km <sup>2</sup> )	Área acumulada (km <sup>2</sup> )	% Área	% Área (acumulada)	Cota i x A i
1400 1350	1375	1.898	19.62	1.2063	12.47	2609.1192
1350 1300	1325	1.558	21.18	0.9907	13.46	2064.9144
1300 1250	1275	1.919	23.09	1.2201	14.68	2446.9973
1250 1200	1225	2.026	25.12	1.2879	15.97	2481.8217
1200 1150	1175	2.315	27.44	1.4716	17.44	2720.0115
1150 1100	1125	2.880	30.32	1.8308	19.27	3239.9533
1100 1050	1075	2.660	32.98	1.6911	20.96	2859.7054
1050 1000	1025	2.805	35.78	1.7833	22.75	2875.2948
1000 950	975	3.218	39.00	2.0459	24.79	3137.8967
950 900	925	3.481	42.48	2.2132	27.01	3220.3685
900 850	875	3.634	46.11	2.3101	29.32	3179.6390
850 800	825	3.888	50.00	2.4719	31.79	3207.9076
800 750	775	4.817	54.82	3.0620	34.85	3732.8965
750 700	725	5.070	59.89	3.2232	38.07	3675.9975
700 650	675	5.339	65.23	3.3942	41.47	3604.0697
650 600	625	5.897	71.13	3.7487	45.22	3685.5369
600 550	575	6.378	77.50	4.0547	49.27	3667.5011
550 500	525	7.059	84.56	4.4876	53.76	3706.1376
500 450	475	7.405	91.97	4.7073	58.46	3517.3091
450 400	425	10.315	102.28	6.5571	65.02	4383.7822
400 350	375	8.384	110.67	5.3297	70.35	3143.9539
350 300	325	9.617	120.28	6.1137	76.47	3125.6152
300 250	275	8.376	128.66	5.3249	81.79	2303.4927
250 200	225	7.490	136.15	4.7614	86.55	1685.2470
200 150	175	7.739	143.89	4.9196	91.47	1354.2966
150 100	125	7.261	151.15	4.6161	96.09	907.6729
100 50	75	3.987	155.14	2.5344	98.62	299.0076
50 0	25	2.168	157.31	1.3783	100.00	54.2041
		$\Sigma = 157.31$				$\Sigma = 108825.09$

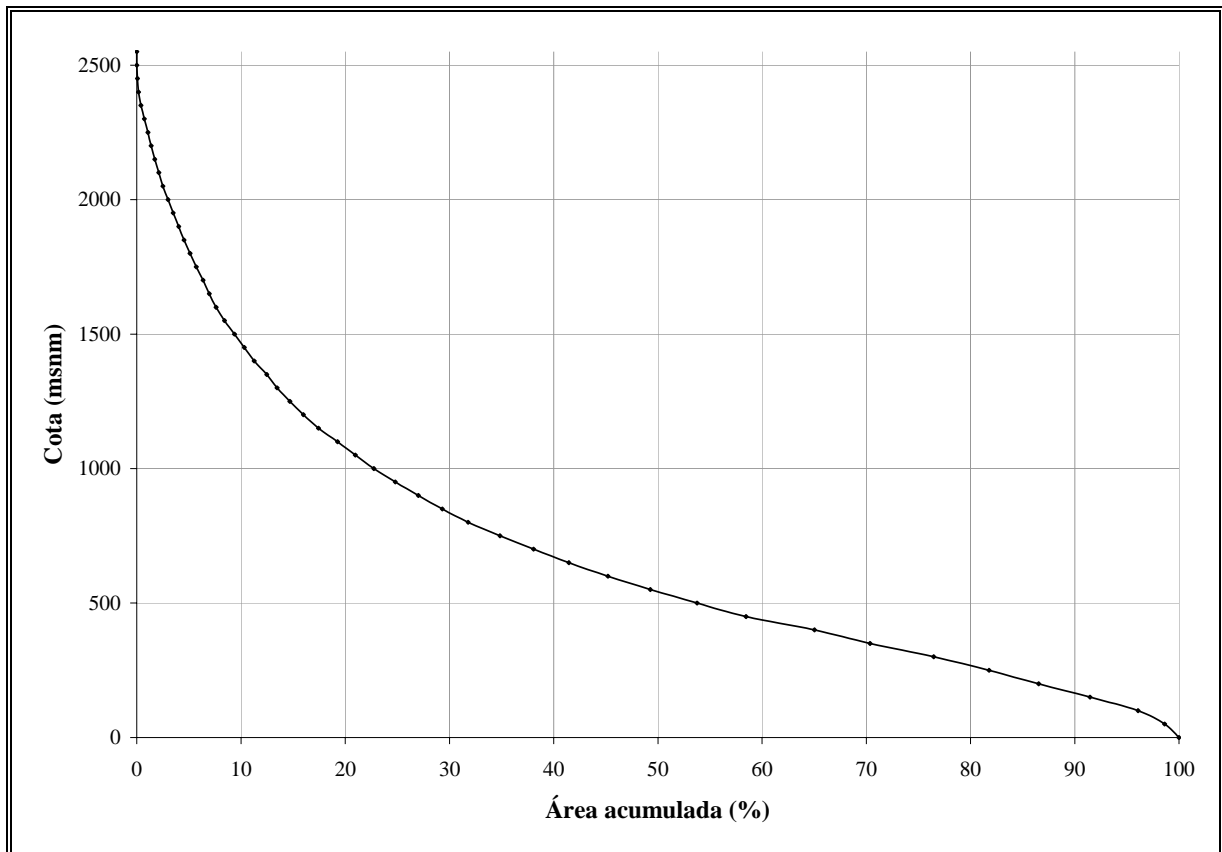


Figura 4. Curva Hipsométrica de la Cuenca del Río Piedras

La elevación media de la cuenca del Río Piedras es **691.8 m.s.n.m.** y la forma cóncava que presenta la curva hipsométrica muestra una cuenca con cumbres escarpadas en su nacimiento, manteniendo después una variación gradual de su elevación.

En el Cuadro 4 se presentan los datos utilizados para el cálculo de la curva hipsométrica para la parte alta de la cuenca del Río Piedras que se puede observar en la Figura 5.

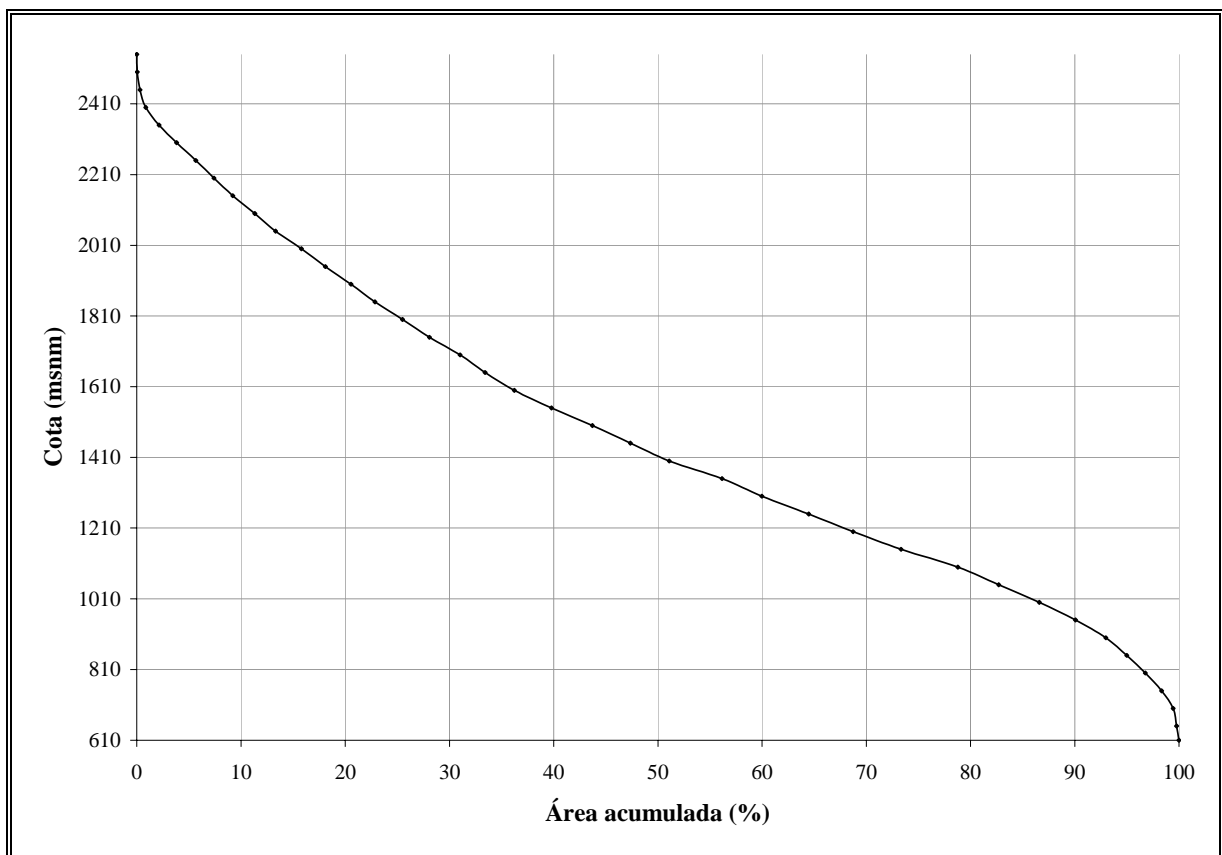
Cuadro 4. Cálculo de la curva hipsométrica de la Subcuenca del Río Piedras

Cotas Intervalo de clase (msnm)	Cota media (msnm)	Área (km <sup>2</sup> )	Área acumulada (km <sup>2</sup> )	% Área	% Área (acumulada)	Cota i x A i
2550			0	0	0	
2550 2500	2525	0.0117	0.01	0.0399	0.04	29.6310
2500 2450	2475	0.0777	0.09	0.2643	0.30	192.2941
2450 2400	2425	0.1632	0.25	0.5551	0.86	395.6907
2400 2350	2375	0.3753	0.63	1.2768	2.14	891.3430
2350 2300	2325	0.4958	1.12	1.6868	3.82	1152.8077
2300 2250	2275	0.5419	1.67	1.8436	5.67	1232.8822
2250 2200	2225	0.5115	2.18	1.7401	7.41	1138.1043
2200 2150	2175	0.5282	2.71	1.7969	9.20	1148.7943
2150 2100	2125	0.6245	3.33	2.1245	11.33	1327.0528
2100 2050	2075	0.5825	3.91	1.9817	13.31	1208.6799
2050 2000	2025	0.7281	4.64	2.4770	15.79	1474.4051
2000 1950	1975	0.6772	5.32	2.3038	18.09	1337.4369
1950 1900	1925	0.7215	6.04	2.4546	20.55	1388.9456
1900 1850	1875	0.6772	6.72	2.3039	22.85	1269.7850
1850 1800	1825	0.7804	7.50	2.6548	25.50	1424.1711
1800 1750	1775	0.7557	8.25	2.5708	28.07	1341.2989
1750 1700	1725	0.8630	9.12	2.9359	31.01	1488.6499
1700 1650	1675	0.7080	9.82	2.4085	33.42	1185.8334
1650 1600	1625	0.8222	10.65	2.7971	36.22	1336.0619
1600 1550	1575	1.0533	11.70	3.5833	39.80	1658.9561
1550 1500	1525	1.1510	12.85	3.9155	43.71	1755.2060
1500 1450	1475	1.0751	13.92	3.6573	47.37	1585.7124
1450 1400	1425	1.0952	15.02	3.7258	51.10	1560.6287
1400 1350	1375	1.4907	16.51	5.0713	56.17	2049.6853
1350 1300	1325	1.1205	17.63	3.8119	59.98	1484.6330
1300 1250	1275	1.3207	18.95	4.4931	64.47	1683.9101
1250 1200	1225	1.2534	20.21	4.2639	68.74	1535.3602
1200 1150	1175	1.3478	21.55	4.5850	73.32	1583.6074
1150 1100	1125	1.6054	23.16	5.4616	78.78	1806.1000
1100 1050	1075	1.1535	24.31	3.9243	82.71	1240.0505
1050 1000	1025	1.1482	25.46	3.9061	86.62	1176.8963



**Cuadro 4 (continuación). Cálculo de la curva hipsométrica de la Subcuenca del Río Piedras**

Cotas Intervalo de clase (msnm)	Cota media (msnm)	Área (km <sup>2</sup> )	Área acumulada (km <sup>2</sup> )	% Área	% Área (acumulada)	Cota i x A i
1000 950	975	1.0143	26.47	3.4506	90.07	988.9182
950 900	925	0.8602	27.33	2.9263	92.99	795.6624
900 850	875	0.5906	27.93	2.0093	95.00	516.7969
850 800	825	0.5213	28.45	1.7734	96.77	430.0640
800 750	775	0.4602	28.91	1.5657	98.34	356.6797
750 700	725	0.3240	29.23	1.1022	99.44	234.8795
700 650	675	0.0945	29.33	0.3213	99.76	63.7563
650 610	630	0.0693	29.39	0.2358	100.00	43.6732
		Σ=	29.39			Σ= 43515.0441



**Figura 5. Curva Hipsométrica de la Subcuenca del Río Piedras**

La elevación media de la subcuenca del Río Piedras es **1,480.38 m.s.n.m.** y la forma que presenta la curva hipsométrica muestra una subcuenca con pequeños picos en las cumbres y una variación gradual de su elevación hasta la altura de los 950 m.s.n.m. donde se empieza a hacer notoria la convergencia de la Serranía de la Horqueta y la Cuchilla de Piedras Blancas, esto se ve reflejado en la disminución del área entre las curvas de nivel, es decir, en el cambio brusco de la pendiente de la curva hipsométrica.

Al representar en el eje de las abscisas de la curva hipsométrica el área acumulada en kilómetros cuadrados en vez de en porcentaje, se puede determinar la elevación media de la hoya ya que si se traza una línea paralela a las abscisas en dicha elevación el área comprendida entre cada una de las porciones de la curva y ésta línea será igual (Figura 6).

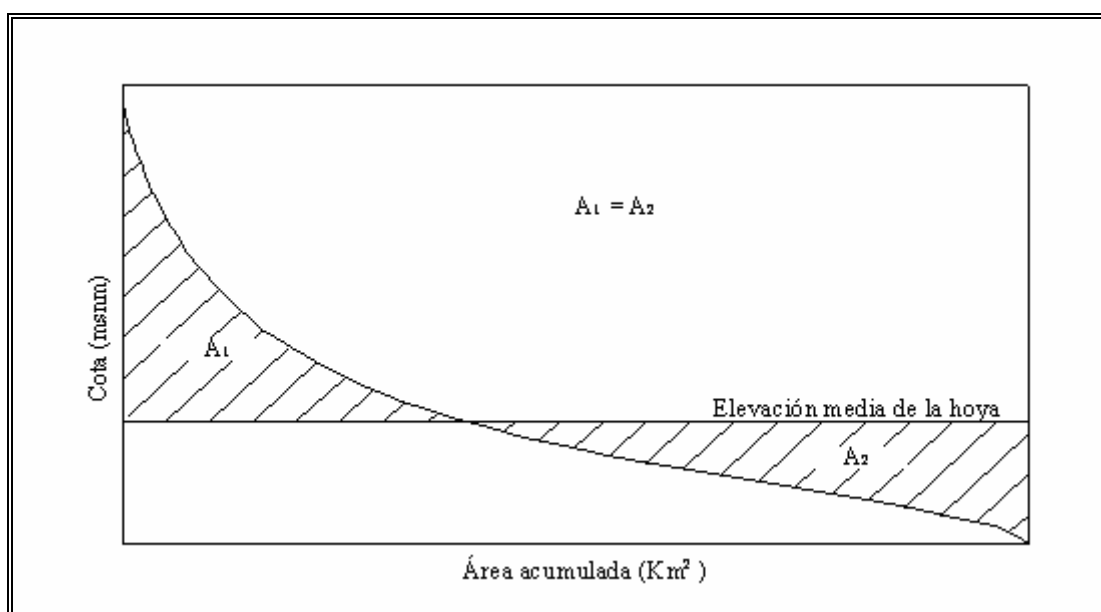


Figura 6. Cálculo de la elevación media de una hoya

Pero éste método puede presentar pequeños errores no muy significativos dependiendo de la forma y de la distribución de las áreas entre cotas de la cuenca, puesto que en las abscisas se grafican unidades de área y en las ordenadas unidades de longitud, entonces no se tiene un parámetro en común para escalar y una misma distribución de áreas podría representarse de diversas formas viéndose más o menos alargada en cualquiera de las dos direcciones.

A ésta problemática no se le ha dado gran relevancia pues hoy en día existen muchos programas computarizados que automáticamente calculan éstos parámetros, así que no se ha determinado una forma especial de dimensionar la curva para obtener un resultado más preciso. Pero a los autores de este documento les parece importante poder determinar de forma acertada la elevación media de la cuenca por todos los métodos posibles para así corroborar los datos arrojados por los distintos modelos computacionales, así que a continuación se expone una nueva forma de calcularla según lo concluido luego de hacer un análisis exhaustivo de las posibilidades.

Si bien se tiene en cuenta, cuando se habla de “áreas” en la forma gráfica tradicional de calcular la pendiente media de una hoya, lo que realmente se calcula son volúmenes puesto que lo que se está multiplicando no es ancho por elevación si no área por elevación.

Entonces el problema se resuelve con hallar la forma de crear una figura tridimensional con una distribución de volúmenes equivalente a la distribución original de la cuenca. Una forma de representar de forma plana la distribución de área según las elevaciones de la hoya es el rectángulo equivalente que fue introducido por los hidrólogos franceses como un intento de comparar la influencia de las características de la cuenca sobre la esorrentía.

La característica más importante del rectángulo equivalente es que tiene igual distribución de alturas que la curva hipsométrica original de la hoya. Ahora bien, teniendo como base el rectángulo equivalente, se le asigna a cada área su elevación real para así obtener un volumen que se puede fragmentar de forma tal que los volúmenes por encima y por debajo del plano divisor sean iguales, la elevación a la que se encuentre dicho plano divisor será la elevación media de la cuenca. Para una mejor comprensión del procedimiento se expondrá de forma gráfica con una cuenca cualquiera.

Primero se construye el rectángulo equivalente de la hoya con los datos de áreas entre curvas de nivel (Figura 7). El procedimiento para construir el rectángulo equivalente de cualquier hoya es el mismo que se aplicó al ítem de las características del relieve de la cuenca que corresponde a calcular dicho rectángulo para la cuenca del Río Piedras.

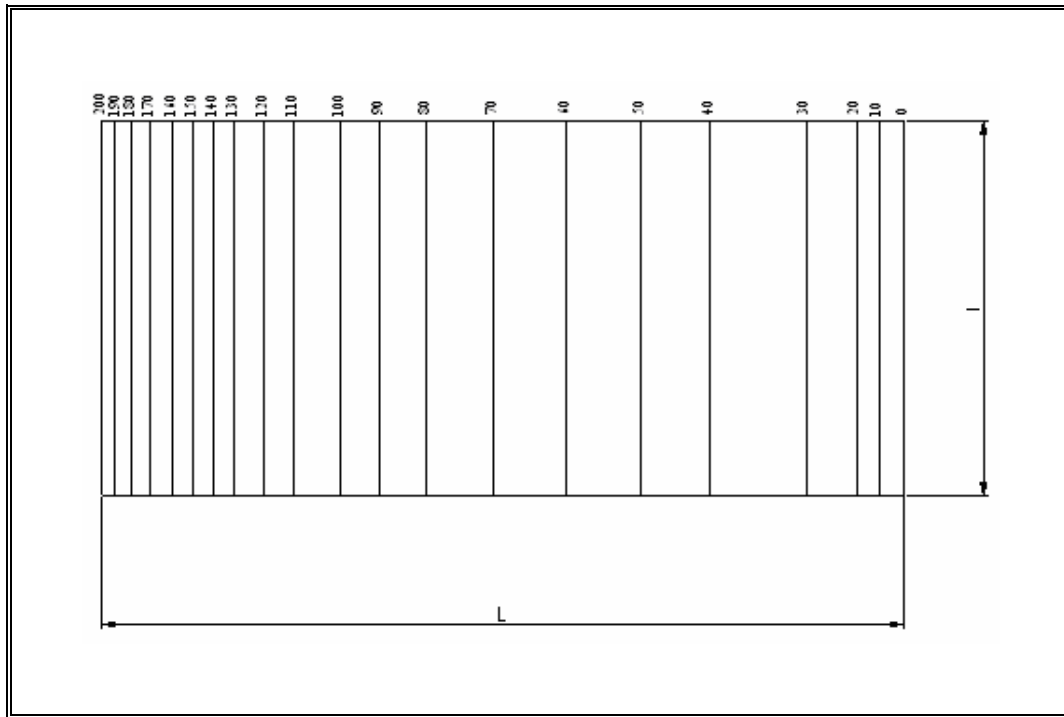


Figura 7. Rectángulo equivalente

Ahora, tomando como base el rectángulo calculado, se le asignan a cada cota la elevación real para ir dándole cuerpo al sólido que representará a la cuenca real (Figura 8).

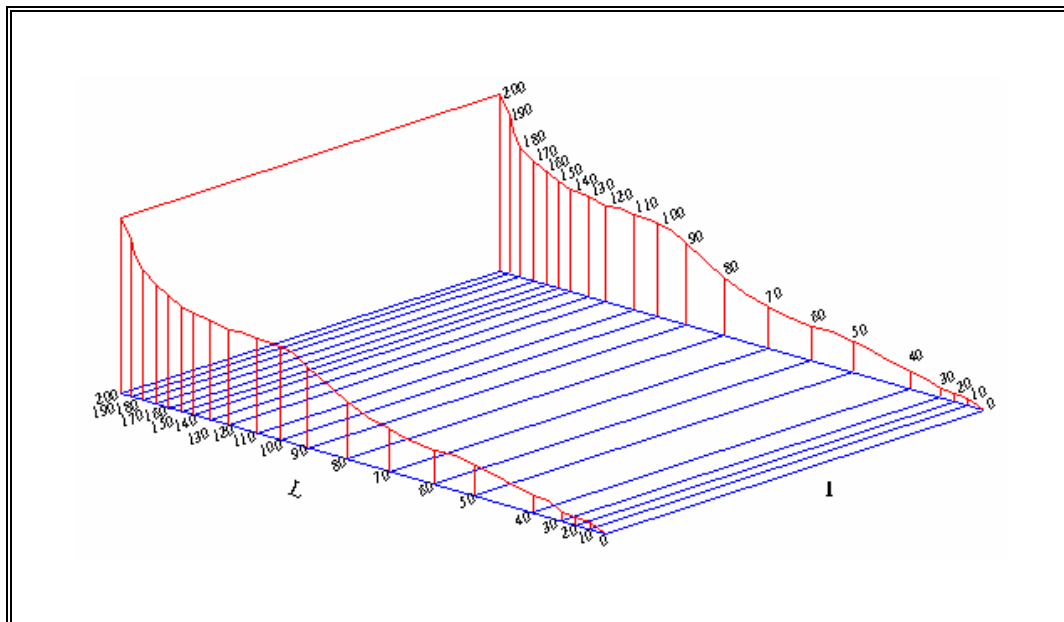


Figura 8. Asignación de las elevaciones correspondientes a cada área del rectángulo equivalente

Una vez se han asignado todas las elevaciones se obtiene un sólido de volumen equivalente (Figura 9) que representa la distribución de volúmenes de tierra de la cuenca original. La exactitud con la realidad dependerá, entre otros factores, de la escala del plano con que se esté trabajando y de la diferencia entre las curvas de nivel.

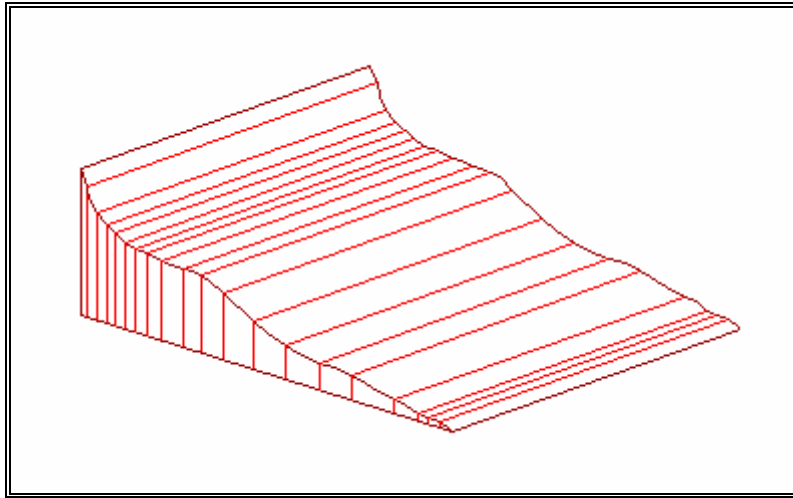


Figura 9. Sólido de volumen equivalente

Ahora solo basta con determinar la altura a la cual se debe introducir un plano paralelo al fondo del sólido de forma tal que los volúmenes por encima y por debajo de dicho plano sean iguales (Figura 10). Si se calcula el volumen como el área lateral del sólido por su profundidad, el procedimiento se reduce a comparar las áreas laterales resultantes ya que la profundidad de cada volumen sería el lado corto del rectángulo equivalente.

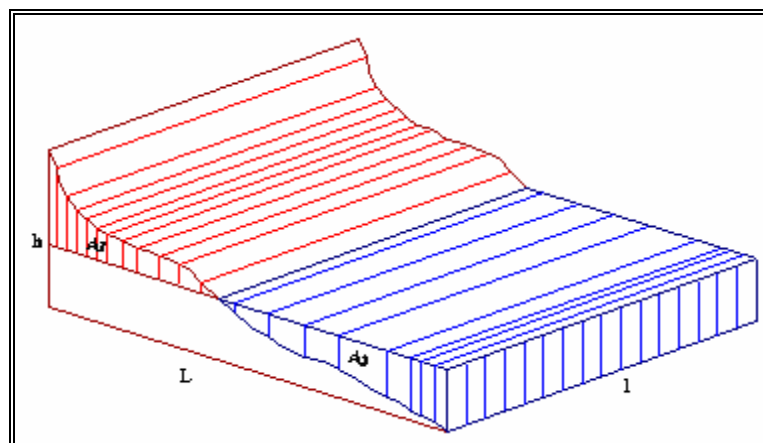


Figura 10. Determinación de la elevación media de la cuenca con el método de los volúmenes

Siguiendo con el ejemplo anterior, se traza el plano y sólo es necesario calcular las áreas  $A_1$  y  $A_2$  ya que, como se explicó anteriormente  $\text{volumen}_1 = A_1 \times l$  y  $\text{volumen}_2 = A_2 \times l$ , entonces si los volúmenes son iguales:

$$\text{volumen}_1 = \text{volumen}_2$$

$$A_1 \times l = A_2 \times l$$

$$A_1 = A_2$$

Lo cual indica que la elevación media de la cuenca es  $h$ .

Después de determinar el rectángulo equivalente para la cuenca y la subcuenca del Río Piedras se calculará la elevación media de la misma y se comparará con la hallada matemáticamente con los datos con que se construyó la curva hipsométrica. Ver numeral 5.3.4.

**5.3.3 Pendiente de la corriente principal:** La velocidad de escurrimiento de las corrientes de agua depende de la pendiente de sus canales fluviales; a mayor pendiente mayor velocidad.

La pendiente media ( $S_1$ ) es la diferencia total de elevación del lecho del río dividido por la longitud entre esos puntos.

$$S_1 = \frac{Elev_{m\acute{a}x} - Elev_{m\acute{i}n}}{L}$$

La pendiente media ponderada ( $S_2$ ) es un valor más razonable. Para calcularlo se traza una línea, tal que el área comprendida entre esa línea y los ejes coordenados sea igual a la comprendida entre la curva del perfil del río y dichos ejes.

Realizando mediciones sobre la corriente principal en el plano digitalizado de la cuenca del Río Piedras se dibujó el perfil longitudinal del Río tanto en la cuenca completa como el tramo de Río que atraviesa la subcuenca, tal como se ve en las Figuras 11 y 12.

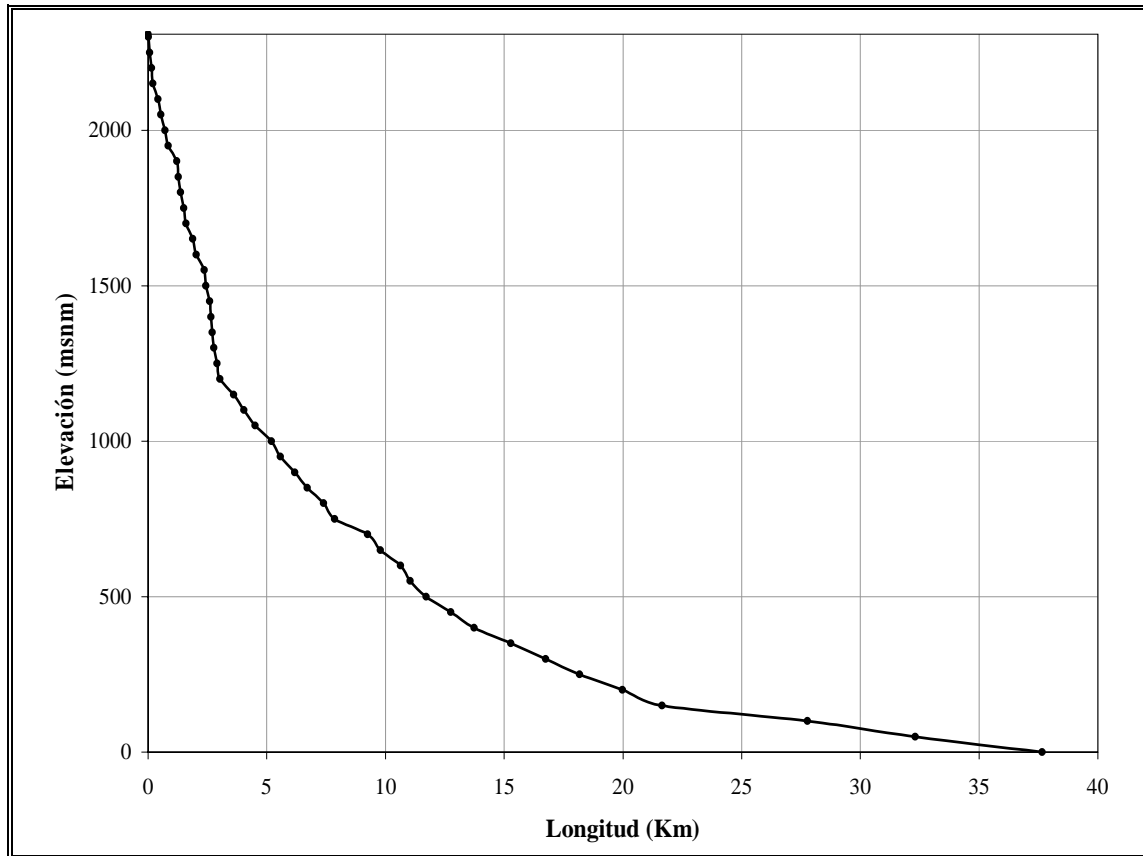


Figura 11. Perfil del río Piedras en toda la cuenca

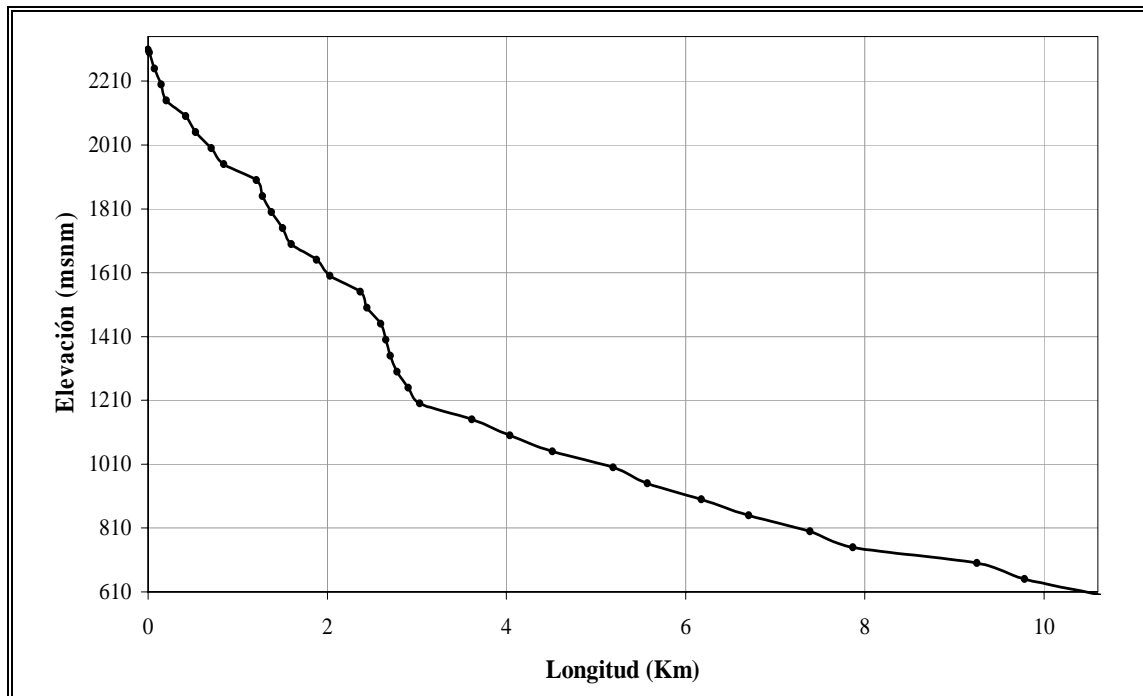


Figura 12. Perfil del río Piedras hasta el límite de la subcuenca

La pendiente media de la corriente se obtiene analizando el perfil de la misma tanto en la cuenca como en la subcuenca.

Parámetros evaluados	Cuenca	Subcuenca
Pendiente media	6.13 %	16.24 %
Pendiente media ponderada	3.76 %	9.92 %

El Río Piedras, en toda su extensión, tiene una pendiente media del 6.13 % y la pendiente media ponderada es 16.24 %. Además la corriente se puede dividir por tramos, ya que en dichos recorridos del flujo hay una pendiente preponderante, los resultados se muestran en la siguiente tabla, tanto para la cuenca como la subcuenca:

**Cuadro 5. Variación de la pendiente del Río Piedras a lo largo de su eje en la cuenca y la subcuenca**

Cuenca		Subcuenca	
Elevación (msnm)	Pendiente (%)	Elevación (msnm)	Pendiente (%)
0-150	0.94	610-1200	7.94
150-550	3.77	1200-1550	52.57
550-1200	8.12	1550-1900	30.25
1200-2309	36.77	1900-2309	33.77

**5.3.4 Rectángulo Equivalente:** Este índice fue introducido por los hidrólogos franceses como un intento de comparar la influencia de las características de la hoya sobre la escorrentía. Se construye un rectángulo equivalente de área igual a la hoya, tal que el lado menor sea  $l$  y el lado mayor  $L$ . Se sitúan las curvas de nivel paralelas a  $l$ , respetando la hipsometría natural de la hoya. Para calcular los lados del rectángulo se aplican las formulas:

$$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 + \sqrt{\left( 1 - \frac{1.12^2}{Kc^2} \right)} \right] \quad l = \frac{Kc\sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 - \sqrt{\left( 1 - \frac{1.12^2}{Kc^2} \right)} \right]$$

donde  $Kc \geq 1.12$ .



El rectángulo equivalente se calculó para la cuenca y la subcuenca del Río Piedras obteniendo como resultado los siguientes parámetros;

Parámetros evaluados	Cuenca	Subcuenca
Lado mayor del rectángulo	33.1	8.25
Lado menor del rectángulo	4.75	3.56

Los lados del rectángulo equivalente encontrados para la cuenca indican que ésta tiene forma alargada y corrobora la poca susceptibilidad que tiene a las crecientes. El rectángulo equivalente de la subcuenca confirma la forma ovalada de la cuenca y la posibilidad de sufrir crecientes.

Con estos valores del rectángulo equivalente se calculó la elevación media de las cuencas como se planteó anteriormente obteniendo 691,83 m.s.n.m. para la cuenca y 1.480,39 m.s.n.m. para la subcuenca, y al comparar estos valores con los obtenidos con la curva hipsométrica (691,80 m.s.n.m. y 1.480,38 m.s.n.m. respectivamente) se nota una similitud milimétrica.

**5.3.5 Tiempo de Concentración:** Es el tiempo que se necesita para que toda la hoya contribuya con la escorrentía superficial en una sección considerada. Se puede medir en minutos u horas.

Existen varios métodos para el cálculo de este parámetro, pero en este caso se usó la ecuación de Kirpich. La formula propuesta por Kirpich es la siguiente:

$$T_c = 0.000325 \times \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

Donde:

L: longitud de la mayor trayectoria de la cuenca, en metros

S: pendiente del cauce principal

Tc: tiempo de concentración, en horas

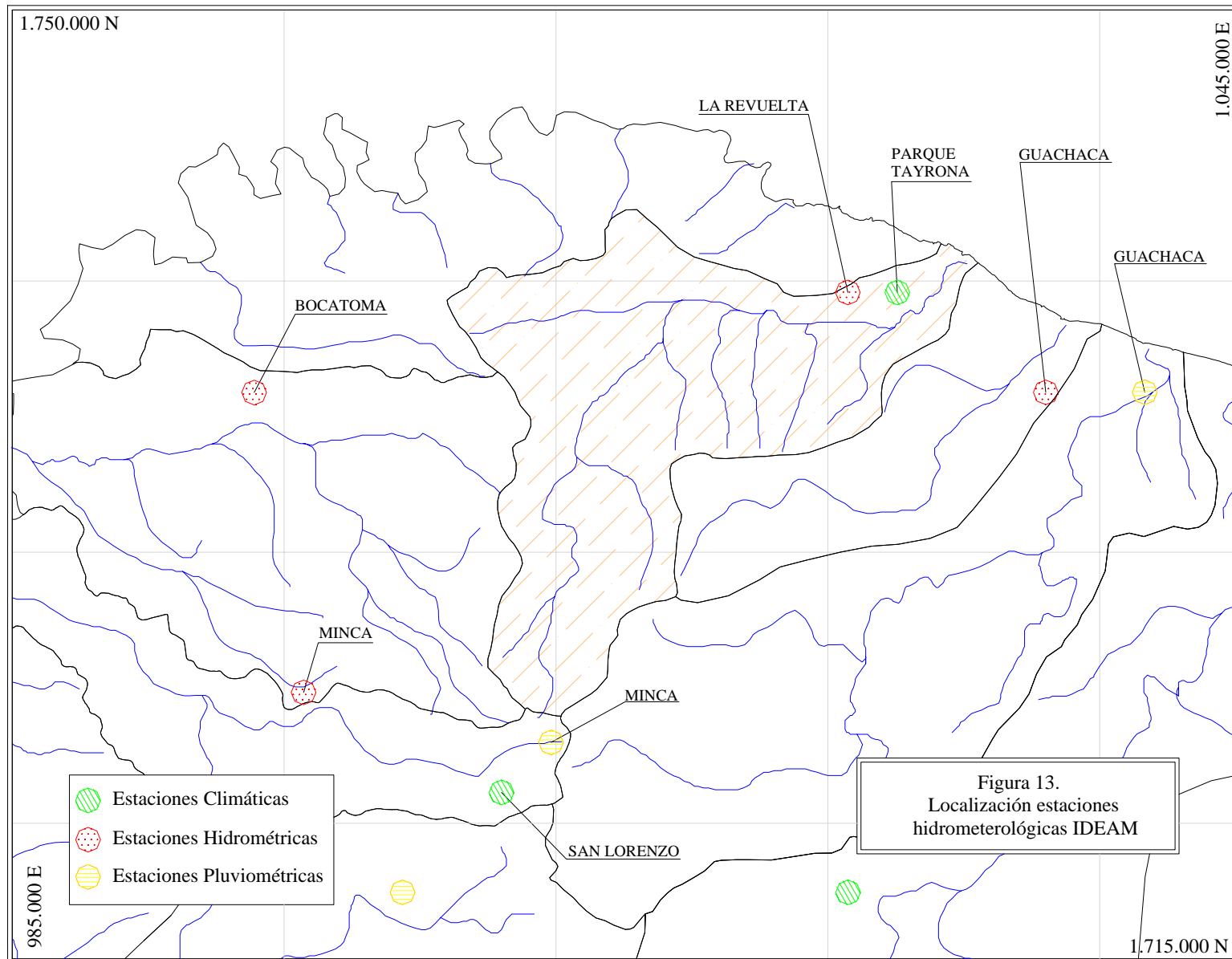
Parámetros evaluados	Cuenca	Subcuenca
Longitud de la mayor trayectoria de la cuenca	37.74 Km	10.55 Km
Pendiente del cauce principal	3.76	9.92
Tiempo de concentración	<b>3.84</b>	<b>0.99</b>

## **6. EVALUACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DE LA CUENCA Y LA SUBCUENCA**

Evaluar hidrometeorológicamente una cuenca implica establecer el comportamiento de la misma desde el punto de vista de precipitación, infiltración, evaporación y evapotranspiración para así determinar la escorrentía superficial. Para lograr esto básicamente es necesario contar con datos confiables y representativos de precipitación y temperatura. La cuenca del Río Piedras no cuenta con una red de estaciones hidrometeorológicas que facilite su caracterización, en la Figura 13 se observa la localización de las estaciones que circundan la cuenca y, a simple vista se podría decir que las estaciones a utilizar deberían ser Parque Tayrona y Minca.

Como se puede observar en la Figura 13, la única estación que provee datos pluviométricos dentro de la cuenca es Parque Tayrona pero, como lo afirman los mismos funcionarios del IDEAM, ésta se encuentra ubicada en una zona boscosa, por lo tanto no registra realmente la cantidad de agua precipitada gracias a la intercepción y absorción de las plantas. Además, la estación Minca, aunque está más cercana a la cuenca que San Lorenzo, se descarta porque no posee registros de temperatura que permitan estimar la evapotranspiración.

De modo pues que, como los datos de la estación Parque Tayrona no son confiables, se hace necesario plantear diferentes alternativas para calcular el comportamiento de la precipitación en la cuenca. La estación pluviométrica más cercana es Guachaca así que como primera opción se trasladaron los datos de ésta estación a la ubicación geográfica de Parque Tayrona y, aunque la precipitación media en toda la cuenca no varió mucho al calcularla por el método de los polígonos de Thiessen, cuando se construyeron las isoyetas no se obtuvo una distribución racional de las isolíneas, esto se debe a que la precipitación registrada en la estación Guachaca es en algunos meses, mucho más elevada que la registrada en la estación Parque Tayrona. Como alternativa final se optó por determinar un factor de correlación entre la precipitación de la cuenca calculada con los datos de las estaciones Parque Tayrona y San Lorenzo y la calculada con los



registros de Guachaca y San Lorenzo. Entonces los datos de la estación Parque Tayrona se afectaron con dicho factor y así se obtuvieron los datos con los cuales se analizó la precipitación en la cuenca del río Piedras.

**Cuadro 6. Cálculo del factor de corrección de la precipitación registrada en la estación Parque Tayrona.**

	Precipitación total anual	Precipitación media total mensual
Guachaca-San Lorenzo	1980.21 mm	165.02 mm
Parque Tayrona-San Lorenzo	1620.45 mm	135.04 mm
Factor de correlación		1.22

## 6.1 PRECIPITACIÓN

En la hidrología la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua. En general la precipitación se refiere a todas las formas de humedades emanadas de la atmósfera y depositadas en la superficie terrestre, tales como lluvia, granizo, rocío, neblina, nieve. Para poder estimar la precipitación se ha desarrollado una gran variedad de instrumentos y técnicas para obtener información de las diferentes fases de la precipitación, los instrumentos para medir la cantidad y la intensidad de la precipitación son los más importantes.

Contrariamente a lo que se espera la cuenca del Río Piedras no cuenta con una buena red de estaciones meteorológicas y por ende no se tiene un registro histórico constante que permita establecer el comportamiento de la precipitación en la misma.

**6.1.1 Medidas pluviométricas:** En este proyecto, para realizar el análisis de la precipitación, se cuenta con una base de datos escasos debido a que la distribución física de las estaciones hidrometeorológicas en la cuenca no es la adecuada. Como se pudo ver en la Figura 13, la localización de las estaciones no facilita el estudio de la precipitación a lo largo y ancho de la cuenca ya que básicamente se tienen distribuidas cuatro estaciones, dos en la parte alta

(Minca y San Lorenzo) por fuera de la cuenca y otras dos en la parte baja (Parque Tayrona y La Revuelta). Como ya explicó anteriormente las estaciones utilizadas fueron Guachaca, Parque Tayrona y San Lorenzo, en cuanto a precipitación y temperatura se refiere, y la estación La Revuelta indica caudales aforados.

**Cuadro 7. Estaciones hidrometeorológicas representativas para la Cuenca del Río Piedras**

Código	Tipo de Estación	Nombre Estación	Nombre Subcuenca	Norte	Este	Elevación	Fecha de Instalación
1501506	CP	San Lorenzo	Piedras	1,721,138.8	1,002,998.9	2200	1969-01
1501510	CO	Parque Tayrona	Mar Caribe	1,739,579.7	1,017,554.5	30	1977-11
1501702	LM	La Revuelta	Piedras	1,739,578.7	1,015,734.8	50	1965-05
1501030	PM	Guachaca	La Sombra	1,735,898.8	1,026,656.1	45	1967-05

Los datos de precipitación media y máxima mensual de las estaciones San Lorenzo, Parque Tayrona, Guachaca y Parque Tayrona Correlacionada se pueden observar en los Anexos del 1 a 6.

Cuando existen estaciones pluviométricas como Parque Tayrona y Guachaca, con datos faltantes en sus registros debido, entre otros factores, a la negligencia del operador o a la ausencia del aparato durante determinado tiempo se deben completar dichos datos faltantes ya que en hidrología se trabaja con series continuas. En general, se puede utilizar la siguiente fórmula para completar dichos datos faltantes, siempre y cuando se conozcan datos durante ese período en otras estaciones pluviométricas cercanas como es el caso de Guachaca y Parque Tayrona.

$$P_x = \frac{1}{n} \left[ \left( \frac{N_x}{N_1} \right) P_1 + \left( \frac{N_x}{N_2} \right) P_2 + \dots + \left( \frac{N_x}{N_n} \right) P_n \right]$$

donde:

n: número de estaciones pluviométricas con datos de registros continuos cercanas a la estación “x”, la cual va a ser completada en su registro

P<sub>x</sub>: precipitación de la estación “x” durante el período de tiempo por completar

$P_1$  a  $P_n$ : precipitación de las estaciones 1 a n durante el período de tiempo por completar

$N_x$ : precipitación media anual a nivel multianual de la estación “x”

$N_1$  a  $N_n$ : precipitación media anual a nivel multianual de las estaciones 1 a n

Como en este caso sólo se cuentan con dos estaciones cercanas la fórmula se reduce a

$$P_{Parque.Tayrona} = P_{Guachaca} \left( \frac{N_{Parque.Tayrona}}{N_{Guachaca}} \right)$$

De la misma forma se correlacionan Minca y San Lorenzo. Así pues, se obtuvo una serie continua de datos de precipitación de las estaciones Parque Tayrona, Guachaca y San Lorenzo tal como se puede observar en los Anexos 1, 3 y 4, donde los datos en negrilla son los correlacionados.

**6.1.2 Análisis estadístico de los datos de precipitación:** En una serie de datos estadísticos de una estación hidrológica de medidas, es indispensable resumir esta multitud de cifras en elementos que caractericen la estación desde el punto de vista considerado. Se buscan definir una serie de n observaciones de valores individuales  $x_i$  con  $i \leq n$ , desde los tres puntos de vista siguientes:

- Valor central o dominante en la serie (media)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

- Dispersión o fluctuación de diversas observaciones alrededor del valor central (desviación estándar)

$$S = \sqrt{\left( \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1} \right)}$$

- Característica de la forma (coeficiente de oblicuidad)

$$C_s = \frac{a}{S^3}$$

donde

$$a = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^3$$

El análisis de frecuencias es un procedimiento para estimar la frecuencia de ocurrencia o probabilidad de ocurrencia de eventos pasados o futuros. El análisis de frecuencia requiere que los datos hidrológicos sean homogéneos e independientes. La restricción de homogeneidad asegura que todas las observaciones provengan de la misma población, mientras que la restricción de independencia asegura que un evento hidrológico, tal como una gran tormenta aislada, no entre al conjunto de datos más de una vez.

Chow (1951) ha demostrado que muchos análisis de frecuencias pueden ser reducidos a la forma:

$$X_T = \bar{X}(1 + C_v K_T)$$

donde  $X_T$  es la magnitud del evento que tiene un período de retorno  $T$  y  $K_T$  es un factor de frecuencia que depende del coeficiente de oblicuidad de los datos.

Existen varios métodos para realizar el análisis estadístico de los datos de precipitación, en este caso se aplicaron distribución Normal, distribución Pearson tipo III, distribución Log-Pearson tipo III y distribución Gumbel, siguiendo los procedimientos expuestos en el libro Fundamentos de Hidrología de Superficie de Francisco Aparicio Mijares. Para determinar las precipitaciones según el período de retorno en cada tipo de distribución es necesario usar una serie de tablas para estimar el factor de frecuencia  $K_T$ , éstas están registradas del Anexo 7 al 9.



Los resultados arrojados por cada distribución se presentan, en el Anexo 10 los de la estación Parque Tayrona Correlacionada y en el Anexo 11 los de la estación San Lorenzo. Ahora bien, es necesario escoger la función de distribución que más se ajuste a cada grupo de datos en cada estación. Entre las pruebas de bondad del ajuste más conocidas se encuentran la  $\chi^2$  y la Kolmogorov-Smirnov, así que éstas fueron aplicadas y se obtuvo como resultado que las funciones de distribución más confiables para las estaciones Parque Tayrona Correlacionado y San Lorenzo son **Normal** y **Gumbel** respectivamente. Para la selección de la función de distribución se realizó un resumen de los resultados de las pruebas efectuadas (Cuadro 8), se han calificado las funciones según el orden de preferencia dando 1 a la de “mejor” ajuste.

Cuadro 8. Selección de la función de distribución

Función	Estación Parque Tayrona		Estación San Lorenzo	
	$\chi^2$	Kolmogorov Smirnov	$\chi^2$	Kolmogorov Smirnov
Normal	1	1	NO	2
Pearson	3	2	2	3
Log-Pearson	NO	4	x	x
Gumbel	2	3	1	1

En los Anexos 12 y 13 se presentan los cuadros resumen de la prueba  $\chi^2$  y en los Anexos 14 y 15 los de Kolmogorov-Smirnov, tanto para la estación Parque Tayrona Correlacionada como para San Lorenzo.

**6.1.3 Precipitación media:** Para la determinación del balance hídrico o cuantificación de la lluvia en una hoya hidrográfica para un intervalo de tiempo específico es importante conocer la precipitación media sobre la misma

**6.1.3.1 Polígonos de Thiessen:** Este método se puede utilizar para una distribución no uniforme de aparatos. Provee resultados más correctos con un área de la hoya aproximadamente plana. El método consiste en atribuir un factor de peso a los totales de precipitación

en cada aparato, proporcionales al área de influencia de cada uno. Sin embargo, no considera influencias orográficas.

Las áreas de influencia se determinan en mapas de la hoya que contengan la localización de las estaciones, uniendo dichos puntos de localización por medio de líneas rectas, y en seguida trazando las mediatrices de estas rectas, formando polígonos. Los lados de los polígonos son el límite de las áreas de influencia de cada estación.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \times P_i)}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

donde:

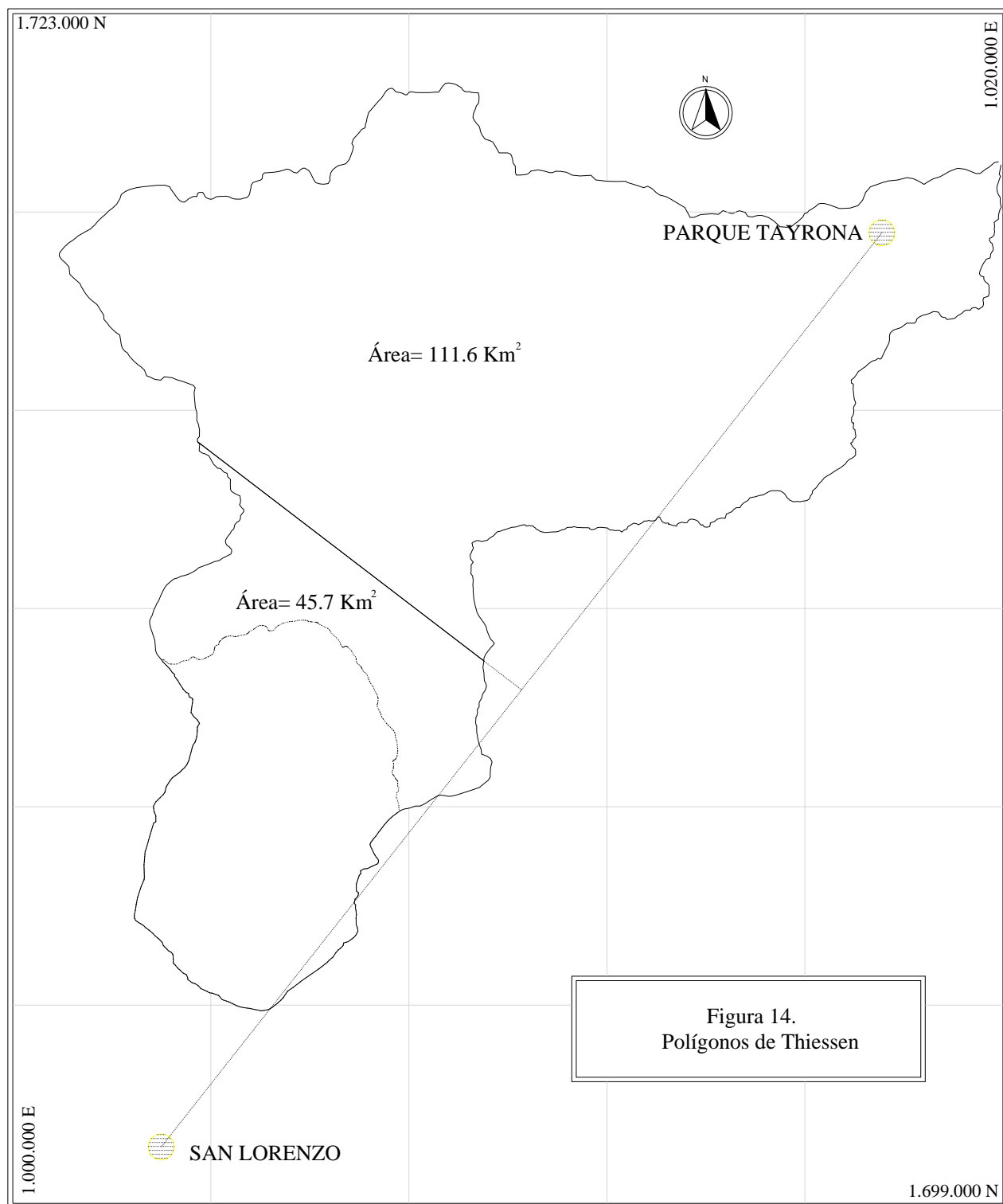
n: número de aparatos pluviométricos

P<sub>i</sub>: precipitación registrada en el aparato pluviométrico i

A<sub>i</sub>: área de influencia correspondiente al aparato pluviométrico i, resultante del método de polígonos de Thiessen.

Las estaciones a utilizar son Parque Tayrona Correlacionado y San Lorenzo, por lo tanto se hizo necesario variar un poco el método de los polígonos de Thiessen ya que el procedimiento se reduce a unir con una línea recta estas dos únicas estaciones, trazando a la vez su mediatriz y así se determina el área aferente que le corresponde a cada estación. En la Figura 14 se observan las áreas de influencia de cada estación, y además es claro que el área de la subcuenca está plena y únicamente influenciada por la estación San Lorenzo.

Para el cálculo de la precipitación media de la cuenca y la subcuenca del Río Piedras se usaron los datos de precipitación total mensual, calculando inicialmente la media mensual multianual de las estaciones San Lorenzo y Parque Tayrona Correlacionado, ponderando los datos según el porcentaje del área que corresponde a cada estación, 71 % Parque Tayrona y 29 % San Lorenzo.



Cuadro 9. Cálculo de la precipitación total anual y media total mensual de la cuenca del Río Piedras

Mes	Estación		Ponderación		Total (mm)
	San Lorenzo (mm)	Parque Tayrona (mm)	San Lorenzo	Parque Tayrona	
enero	16.24	30.72	4.72	21.79	26.51
febrero	25.40	32.93	7.39	23.36	30.74
marzo	31.97	28.00	9.30	19.86	29.16
abril	152.31	111.00	44.29	78.72	123.01
mayo	281.50	150.98	81.86	107.07	188.94
junio	299.33	68.67	87.05	48.70	135.75
julio	315.33	59.53	91.70	42.22	133.91
agosto	371.39	108.44	108.00	76.91	184.91
septiembre	409.75	198.72	119.16	140.93	260.09
octubre	365.28	291.92	106.23	207.03	313.26
noviembre	213.88	247.97	62.20	175.86	238.05
diciembre	102.41	164.49	29.78	116.65	146.43

Precipitación total anual: **1810.76 mm**Precipitación media total mensual: **150.90 mm**

Cuadro 10. Cálculo de la precipitación total anual y media total mensual de la subcuenca del Río Piedras

Mes	San Lorenzo(mm)
enero	16.24
febrero	25.40
marzo	31.97
abril	152.31
mayo	281.50
junio	299.33
julio	315.33
agosto	371.39
septiembre	409.75
octubre	365.28
noviembre	213.88
diciembre	102.41

Precipitación total anual: **2584.78 mm**Precipitación media total mensual: **215.40 mm**

**6.1.3.2 Isoyetas:** Es el método más preciso. Se utilizan curvas de igual precipitación. El trazado de esas curvas es semejante al de las curvas de nivel, en donde la altura de agua precipitada substituye la cota del terreno. Se debe considerar los efectos orográficos de la hoya, de modo que el mapa final represente un modelo de precipitación más real que si hubiera sido obtenido sin tener en cuenta dichos efectos.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left( \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \right) A_{i,i+1}}{\sum_{i=1}^{n-1} A_{i,i+1}}$$

donde:

n: número de curvas de igual precipitación

$P_i$ : precipitación correspondiente a la curva de igual precipitación i

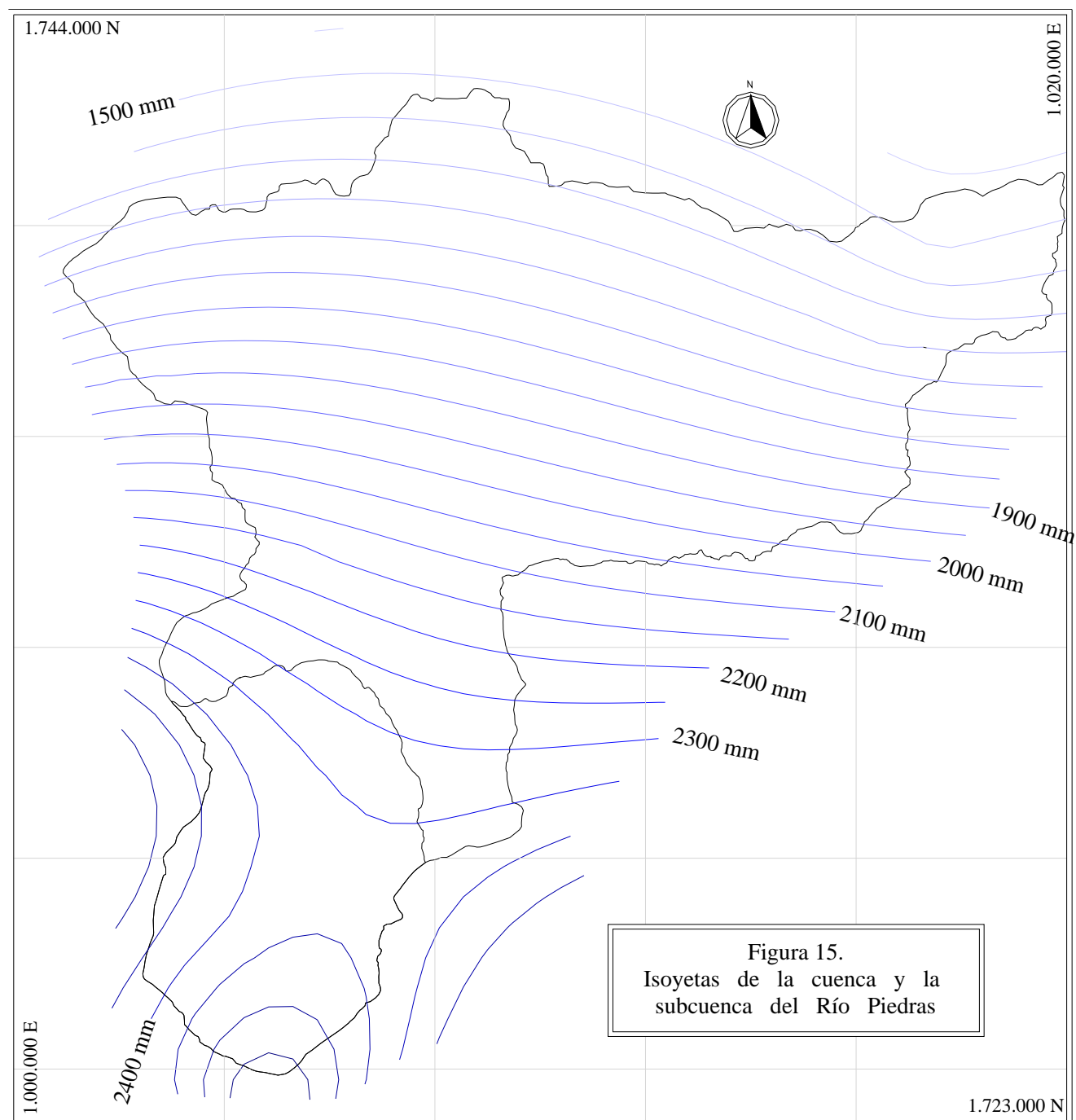
$P_{i+1}$ : precipitación correspondiente a la curva de igual precipitación i+1

$A_{i,i+1}$ : área entre las curvas de igual precipitación i e i+1

Para crear las isoyetas a partir de una nube de puntos se hizo necesario trabajar con las estaciones hidrológicas que circundan la cuenca. Específicamente se utilizaron los registros de precipitación total anual multianual de las estaciones Punta Betín, Avenida del Libertador, Universidad del Magdalena, Sena Agropecuario, Girocasaca, San Lorenzo, Minca, Vista Nieves, Alto de Mira, Parque Tayrona, Guachaca y Buritaca. A partir de esos puntos se realizó una interpolación utilizando el programa Surfer 7 para obtener finalmente las isoyetas de la cuenca y subcuenca del Río Piedras, Figura 15. A partir de éstas curvas, usando AutoCAD 2004, se planimetraron las áreas entre las isolíneas obteniendo como resultado las siguientes precipitaciones, con las cuales se hizo el análisis de precipitación.

**Cuadro 11. Determinación de la precipitación total anual y media total mensual de la Subcuenca del Río Piedras por el método de las isoyetas**

	Precipitación total anual	Precipitación media total mensual
Cuenca	1958.8 mm	163.2 mm
Subcuenca	2361.5 mm	196.8 mm



**6.1.4 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia IDF:** Se analizan las relaciones intensidad-duración-frecuencia de las precipitaciones registradas, determinándose para los diferentes intervalos de duración de la lluvia el tipo de ecuación y el número de parámetros de esa ecuación que mejor caracterizan aquellas relaciones. En general es usual en hidrología emplear ecuaciones que correlacionan los valores de IDF, en este caso se escogió el método de correlación lineal que permite calcular las curvas a partir de la ecuación

$$i = \frac{K \times T^m}{(d + c)^n}$$

donde  $k$ ,  $m$ ,  $n$  y  $c$  son constantes que se calculan aplicando análisis de correlación lineal múltiple, mientras que  $d$  es la duración del evento. Como los datos se agruparon lo suficiente en torno a líneas rectas el valor de  $c$  es cero.

Para poder obtener las IDF primero se calcularon las precipitaciones para 5, 10, 25, 50 y 100 años de periodo de retorno, esto se realizó aplicando la formula de Chow y los coeficientes de frecuencia ( $K_t$ ) usando las distribuciones de frecuencia de **Gumbel** para San Lorenzo y **Normal** para Parque Tayrona Correlacionado. Luego se calculó la intensidad para cada precipitación hallada del paso anterior para duraciones que van desde 10 minutos hasta 120 minutos en intervalos de 10 minutos, dividiendo el valor de la precipitación entre la duración.

**Cuadro 12. Precipitaciones e intensidades (mm/h) para cada duración según el período de retorno para la estación Parque Tayrona Correlacionado**

periodo de retorno	$K_t$	$X_t$ (mm)	Duración											
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
5	0.8415	175.1	1038.0	519.0	346.0	259.5	207.6	173.0	148.3	129.7	115.3	103.8	94.4	86.5
10	1.2817	191.7	1137.8	568.9	379.3	284.5	227.6	189.6	162.5	142.2	126.4	113.8	103.4	94.8
25	1.7511	209.5	1276.9	638.5	425.6	319.2	255.4	212.8	182.4	159.6	141.9	127.7	116.1	106.4
50	2.0506	220.8	1342.2	671.1	447.4	335.6	268.4	223.7	191.7	167.8	149.1	134.2	122.0	111.9
100	2.3266	231.2	1472.8	736.4	490.9	368.2	294.6	245.5	210.4	184.1	163.6	147.3	133.9	122.7

**Cuadro 13. Precipitaciones e intensidades para cada duración según el período de retorno para la estación San Lorenzo**

periodo de retorno	Kt	Xt (mm)	Duración											
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
5	0.913	129.3	775.7	387.9	258.6	193.9	155.1	129.3	110.8	97.0	86.2	77.6	70.5	64.6
10	1.615	150.8	904.5	452.3	301.5	226.1	180.9	150.8	129.2	113.1	100.5	90.5	82.2	75.4
25	2.502	177.9	1067.3	533.7	355.8	266.8	213.5	177.9	152.5	133.4	118.6	106.7	97.0	88.9
50	3.161	198.0	1188.1	594.1	396.0	297.0	237.6	198.0	169.7	148.5	132.0	118.8	108.0	99.0
100	3.543	209.7	1258.3	629.1	419.4	314.6	251.7	209.7	179.8	157.3	139.8	125.8	114.4	104.9

Ahora sólo resta aplicar el método de correlación lineal con éstos valores, teniendo en cuenta que si se aplican las leyes de los logaritmos a la ecuación del método de correlación lineal se obtiene que

$$\text{Log}(i) = \text{Log}(k) + m\text{Log}(T) - n\text{Log}(d + c)$$

o bien

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2$$

donde:

$$y = \text{Log}(i)$$

$$a_0 = \text{Log}(k)$$

$$a_1 = m$$

$$x_1 = \text{Log}(T)$$

$$a_2 = -n$$

$$x_2 = \text{Log}(d + c)$$

al hacer un ajuste de correlación lineal múltiple de una serie de tres tipos de datos se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones

$$\sum y = N \times a_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2$$

$$\sum x_1 \times y = a_0 \sum x_1 + a_1 \sum x_1^2 + a_2 \sum x_1 \times x_2$$

$$\sum x_2 \times y = a_0 \sum x_2 + a_1 \sum x_1 \times x_2 + a_2 \sum x_2^2$$



donde  $N$  es el numero de datos y las incógnitas son  $a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$ ;  $x_1$ ,  $x_2$  y  $y$  son, respectivamente, los logaritmos del periodo de retorno, la duración y la intensidad, obtenidos de un registro de precipitación. Al resolver este sistema de ecuaciones se hayan los valores de los coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$ , y de esta forma es posible determinar los parámetros  $m$ ,  $n$  y, con el antilogaritmo de  $a_0$ , el valor de  $k$  y así se completa la ecuación de la curva intensidad-duración-frecuencia.

El sistema de ecuaciones para la estación Parque Tayrona Correlacionado es el siguiente

$$35.6 = 60a_0 + 81.55a_1 + 103.4a_2$$

$$49.88 = 81.55a_0 + 123.95a_1 + 140.54a_2$$

$$55.43 = 103.4a_0 + 140.54a_1 + 184.12a_2$$

$$\text{dando como resultado } a_0 = 2.16, \quad a_1 = 0.11, \quad a_2 = -1$$

$$\text{entonces} \quad K = 145.29, \quad m = 0.11, \quad n = 1$$

o sea que la ecuación de intensidad para la estación Parque Tayrona correlacionado es

$$i = \frac{145.29 \times T^{0.11}}{d}$$

El sistema de ecuaciones para la estación San Lorenzo es el siguiente

$$30.50 = 60a_0 + 81.55a_1 + 103.4a_2$$

$$43.60 = 81.55a_0 + 123.95a_1 + 140.54a_2$$

$$46.63 = 103.4a_0 + 140.54a_1 + 184.12a_2$$

$$\text{dando como resultado } a_0 = 2.01, \quad a_1 = 0.16, \quad a_2 = -1$$

$$\text{entonces} \quad K = 102.16, \quad m = 0.16, \quad n = 1$$

o sea que la ecuación de intensidad para esta estación es

$$i = \frac{102.16 \times T^{0.16}}{d}$$

Las curvas intensidad-duración-frecuencia se crean de la ecuación generada, dejando fijo el periodo de retorno y variando la duración de la lluvia para obtener los distintos valores de intensidad. Las IDF para las estaciones Parque Tayrona Correlacionado y San Lorenzo se pueden observar en las Figuras 16 y 17 respectivamente.

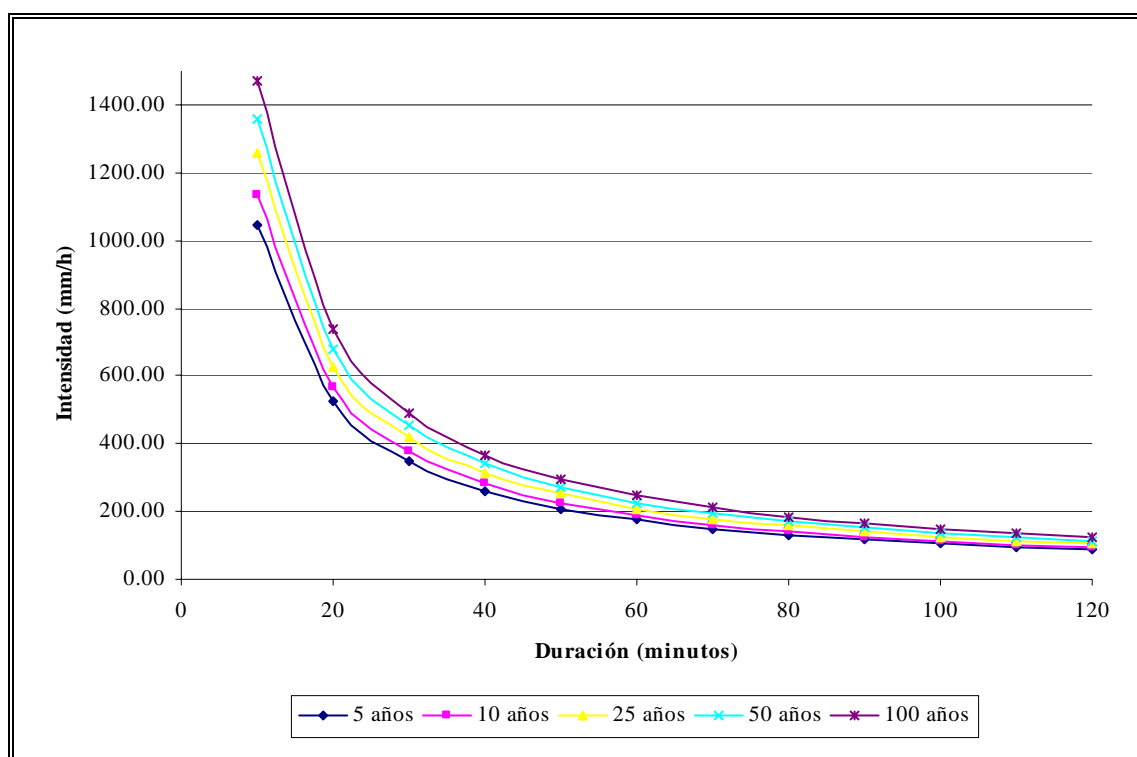


Figura 16. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación Parque Tayrona Correlacionado

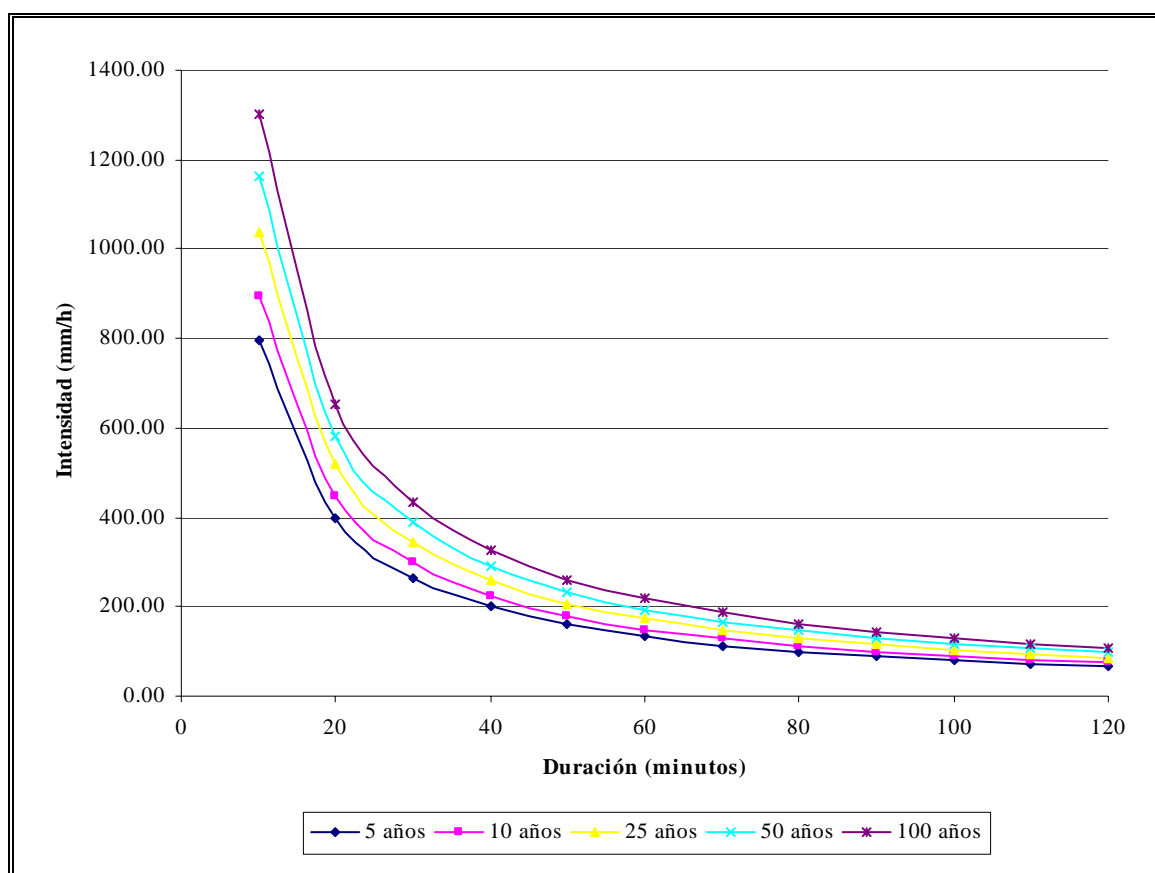


Figura 17. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación San Lorenzo

## 6.2 INFILTRACIÓN

La lluvia que cae se consume totalmente en intercepción, detención superficial o almacenamiento en depresiones, humedad del suelo, precipitación directa sobre la corriente de agua que sirve de drenaje al área considerada, agua subterránea, flujo subsuperficial y escorrentía superficial. La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno al suelo, se distingue del proceso de percolación porque este último es el movimiento hacia abajo del agua, desde o a través de la zona no saturada hasta el nivel freático o zona saturada.

**6.2.1 Clasificación hidrológica de los suelos según la Soil Conservation Service:** El Soil Conservation Service (1972), SCS, desarrollo un método para calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta, las cuales incluyen la intercepción, la detención superficial y la infiltración propiamente dicha. En este método la profundidad efectiva de precipitación, o profundidad de escorrentía, es una función de la profundidad total de precipitación, y de un parámetro de abstracción referido al número de curva de escorrentía, número de curva o CN. El número de curva varía en un rango de 1 a 100, existiendo una función de las siguientes propiedades productoras de escorrentías de la hoya hidrográfica: Tipo de suelo hidrológico, utilización y tratamiento del suelo, condiciones de la superficie del terreno y condición de humedad antecedente del suelo.

Para la tormenta como un todo, la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa  $P_e$ , es siempre menor o igual a la profundidad de precipitación  $P$ ; de manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional de agua retenida en la cuenca  $F_a$  es menor o igual a alguna retención potencial máxima  $S$ . Existe una cierta cantidad de precipitación  $I_a$  (abstracción inicial antes del encharcamiento) para la cual no ocurrirá escorrentía, luego la escorrentía potencial es  $P - I_a$ . La hipótesis del método del SCS consiste en que las relaciones de las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales son iguales, es decir,

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

Del principio de continuidad

$$P = P_e + I_a + F_a$$

Combinando las formulas anteriores y resolviendo para  $P_e$ , se tiene

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

la cual es la ecuación básica para el cálculo de la profundidad del exceso de precipitación o escorrentía directa de una tormenta utilizando el método del SCS. Al estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales se desarrollo una relación empírica:

$$I_a = 0.2 \times S$$

Con base en esto el valor de  $P_e$  queda:

$$P_e = \frac{(P - 0.2 \times S)^2}{P + 0.8 \times S} \text{ (mm)}$$

donde

$$S = \left( \frac{2540}{CN} - 25.4 \right) \times 10 \text{ (mm)}$$

**6.2.1.1 Clasificación hidrológica de los suelos:** Los grupos hidrológicos en que se pueden dividir los suelos son utilizados en el planteamiento de cuencas para la estimación de la escorrentía a partir de la precipitación. Los suelos han sido clasificados en cuatro grupos, B, C y D, de acuerdo con el potencial de escurrimiento.

Grupo A (Bajo potencial de escorrentía). Suelos que tienen alta tasa de infiltración aún cuando estén muy húmedos. Consisten de arenas o gravas profundas bien a excesivamente drenados. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua.

Grupo B (Moderadamente bajo potencial de escorrentía). Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasas de transmisión de agua moderadas.

Grupo C (Moderadamente alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo; suelos de textura moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o alkali, o suelos con niveles freáticos moderados. Estos suelos pueden ser

pobremente drenados o bien a moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50-100 cm).

Grupo D (Alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a sales o alkali, y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen tasas de transmisión de agua muy lenta.

Debido a la ubicación geográfica de la cuenca del Río Piedras en el afloramiento rocoso de La Sierra Nevada de Santa Marta y a las características físicas del suelo que la conforma, como ya se mencionó en las generalidades de la cuenca, se tiene una clasificación hidrológica en el **Grupo C**.

**6.2.1.2 Condición de humedad antecedente:** El método del número de curva de escorrentía tiene tres niveles de humedad antecedente, dependiendo de la precipitación total en los cinco días previos a la tormenta. La condición de humedad antecedente seca (CHA I) tiene el menor potencial de escorrentía, con los suelos estando lo suficientemente secos para un arado satisfactorio o para que una siembra se lleve a cabo. La condición de humedad antecedente promedio (CHA II) tiene un potencial de escorrentía promedio. La condición de humedad antecedente húmeda (CHA III) tiene el mayor potencial de escorrentía, con la hoya hidrográfica prácticamente saturada de precipitaciones anteriores. La condición de humedad antecedente puede ser determinada a partir de la información de la precipitación de los cinco días anteriores a la tormenta de diseño. Para una precipitación acumulada de los cinco días previos al evento en consideración que varíe entre 0-3.30 mm, 3.50-5.25 mm y más de 5.25 mm se trabaja con una CHA tipo I, II y III respectivamente.

Debido a razones económicas y por falta de colaboración por parte de algunas entidades estatales no fue posible analizar todos los datos existentes en lo que a precipitación diaria sobre la cuenca se refiere. Ya que solo se cuenta con dos estaciones, que aunque mal

distribuidas son las únicas existentes, lo que se intentó hacer fue obtener la información diaria de cada estación para así compararlas y poder determinar el día, mes y año en el cual ocurrió simultáneamente el evento que afectó en mayor grado a la cuenca, teniendo en cuenta la condición de humedad antecedente.

De todas formas se analizaron las precipitaciones máximas mensuales de precipitación en veinticuatro horas de ambas estaciones hidrometeorológicas (Minca y Parque Tayrona) y en todos los casos la sumatoria de los registros de precipitación de los cinco días anteriores a las máximas tormentas halladas excedían los 5.25 cm, por lo cual no cabe duda alguna de que la condición de humedad antecedente con la cual se debe trabajar es **CHA III**, tanto en la cuenca como en la subcuenca.

**6.2.1.3 Determinación del número de curva de escorrentía CN:** Actualmente están en uso cuadros de número de curva de escorrentía CN para varias coberturas hidrológicas del suelo. El Anexo 16 muestra números de curva para áreas agrícolas cultivadas. Se escogió esta tabla debido a que es la que se ajusta más a las características de la cobertura de la cuenca del Río Piedras. Los números de curva mostrados en este cuadro son para un promedio de la condición CHA II. Los números de curva de escorrentía para las condiciones CHA I y CHA III en términos del valor de la condición CHA II se muestran en el Anexo 17.

Según el resumen de un estudio realizado por CORPAMAG la cuenca del Río Piedras tiene la siguiente distribución en su cobertura: 38445617.8 m<sup>2</sup> de rastrojo, 55080740.9m<sup>2</sup> de potrero, 54734667.5 m<sup>2</sup> de bosque, 5065257.3 m<sup>2</sup> de matorral, 817991.9m<sup>2</sup> de cultivo, 2847240.9m<sup>2</sup> de palma y 314612.3m<sup>2</sup> de banano. Ver Anexo 18.

Para determinar el CN de la cuenca se clasificaron las áreas anteriores y luego se procedió a hacer la respectiva ponderación para calcular el CN, como se muestra en el Cuadro 14, con el cual se estimó el almacenamiento total posible en la cuenca.

**Cuadro 14. Determinación de la Curva Número de la cuenca del Río Piedras por el método de las isoyetas**

Uso de la tierra	Área (m <sup>2</sup> )	Área (%)	CN	Ponderación del CN
Rastrojo	38445617.8	24.4	91	2224.04
Pastos de pastoreo	55080740.9	35.0	79	2766.18
Bosque	59799924.8	38.0	73	2775.09
Cultivo curvas de nivel	817991.9	0.5	82	42.64
Cultivos hileras rectas	3161853.2	2.0	85	170.85
<b>CN<sub>CHA II</sub> →</b>				<b>80</b>

Con la ayuda del Anexo 17 se determinó que el número de curva de escorrentía correspondiente a la cuenca para una condición de humedad antecedente CHA III es **CN<sub>CHA III</sub> 91**.

El procedimiento para calcular el CN de la subcuenca ídem al anterior. Los datos para la subcuenca son 2407410.49 m<sup>2</sup> de potrero, 2498533.475 m<sup>2</sup> de rastrojo y 24485628.06 m<sup>2</sup> de bosque.

**Cuadro 15. Determinación de la Curva Número de la subcuenca del Río Piedras por el método de las isoyetas**

Uso de la tierra	Área (m <sup>2</sup> )	Área (%)	CN	Ponderación del CN
Rastrojo	2498533.475	8.5	91	775.21
Pastos de pastoreo	2407410.49	8.1	79	643.08
Bosque	24485628.06	83.3	73	6083.9
<b>CN<sub>CHA II</sub> →</b>				<b>75</b>

Con la ayuda del Anexo 17 se determinó que el número de curva de escorrentía correspondiente a la subcuenca para una condición de humedad antecedente CHA III es **CN<sub>CHA III</sub> 88**.



**6.2.1.4 Estimación de la escorrentía directa  $P_e$  según retención potencial máxima  $S$ :** Una vez determinados los números de curva para la cuenca y la subcuenca se procede a estimar la retención potencial máxima para cada una de ellas teniendo en cuenta que

$$S = \left( \frac{2540}{CN} - 25.4 \right) \times 10 \text{ (mm)}$$

y

$$P_e = \frac{(P - 0.2 \times S)^2}{P + 0.8 \times S} \text{ (mm)}$$

Parámetros evaluados	Cuenca	Subcuenca
Curva Número CN	91	88
Precipitación media (mm)	163,2	196,8
Retención potencial máxima $S$ (mm)	<b>25,1</b>	<b>34,6</b>
Escorrentía directa $P_e$ (mm)	<b>136,5</b>	<b>160,6</b>

**Cuadro 16. Infiltración en la Cuenca del Río Piedras**

Mes	Precipitación (mm)		Infiltración (cm)
	Media	Efectiva	
enero	26,6	9,94	1,66
febrero	30,8	13,03	1,77
marzo	29,1	11,82	1,73
abril	122,9	97,15	2,57
mayo	188,5	161,41	2,71
junio	135	108,95	2,61
julio	133,1	107,09	2,6
agosto	184,1	157,04	2,71
septiembre	259,4	231,54	2,79
octubre	313	284,78	2,83
noviembre	238,2	210,46	2,77
diciembre	146,6	120,27	2,64

Cuadro 17. Infiltración en la Subcuenca del Río Piedras

Mes	Precipitación (mm)		Infiltración (cm)
	Media	Efectiva	
enero	3,7	0,33	0,34
febrero	5,9	0,03	0,59
marzo	10,8	0,4	1,04
abril	61,6	33,49	2,81
mayo	168,2	132,71	3,54
junio	155,2	120,18	3,5
julio	173,3	137,73	3,56
agosto	209,3	172,77	3,65
septiembre	307,8	269,79	3,8
octubre	277,7	240,04	3,76
noviembre	138	103,64	3,43
diciembre	41	16,91	2,41

### 6.3 EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evaporación se produce básicamente por el aumento de energía cinética que experimentan las moléculas de agua cercanas a la superficie de un suelo húmedo o una masa de agua, producido por la radiación solar, el viento y las diferencias en presión de vapor. El conocimiento de la evapotranspiración es un factor determinante en el diseño de obras de conducción, almacenamiento y abastecimiento, especialmente en zonas cálidas como las del norte del país en las que la evapotranspiración es alta, ya que se podría incluir en el diseño volúmenes de agua con los cuales no será posible contar realmente. La evapotranspiración potencial es la pérdida de agua observada en una superficie líquida o sólida saturada, por evaporación y por transpiración de las plantas, que ocurriría en el caso que hubiera un adecuado abastecimiento de humedad de agua el suelo en todo momento. Mientras que la evapotranspiración real es la pérdida de agua observada en una superficie líquida o sólida saturada, en las condiciones reinantes atmosféricas y de humedad del suelo, por fenómenos de

evaporación y transpiración de las plantas. Para determinar la evapotranspiración potencial de la cuenca y subcuenca del Río Piedras se utilizó el método de Thornthwaite.

**6.3.1 Método de Thornthwaite:** Este método se desarrolló correlacionando datos de evapotranspiración potencial medida en evapotranspirómetros localizados en hoyas hidrológicas, con datos de temperatura media mensual y longitud del día. Para un mes de treinta (30) días e insolación diaria de doce (12) horas:

$$E_j = \left( \frac{10 \times t_j}{I} \right)^a \times 1.6$$

donde

$E_j$ : evapotranspiración potencial mensual del mes  $j$ , no ajustada, en cm

$t_j$ : temperatura media mensual del mes  $j$ , en °C

$I$ : índice de calor

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{t_j}{5} \right)^{1.514}$$

$a$ : ecuación cúbica de la forma

$$a = 0.675 \times 10^{-6} I^3 - 0.771 \times 10^{-4} I^2 + 1.792 \times 10^{-2} I + 0.49$$

Los valores obtenidos de  $E_j$  deben ser ajustados a la longitud del día y al número de días del mes. Debido a tal ajuste, los valores de  $E_j$  obtenidos deben ser multiplicados por el factor de corrección  $K_a$  según sea la latitud de la estación y el mes de lectura de la temperatura según se presenta en el Anexo 19. Entonces la ecuación de evapotranspiración ajustada sería

$$E_j = 1.6 K_a \left( \frac{10 \times t_j}{I} \right)^a$$

Para determinar la evapotranspiración en la cuenca del Río Piedras se utilizaron los datos de temperatura media mensual de las estaciones Parque Tayrona y San Lorenzo (Anexo 20). Para estimar la evapotranspiración en la subcuenca basta con calcularla en la estación de San Lorenzo ya que, como se pudo observar en la Figura 14, esta área está representada por los registros de dicha estación.

**Cuadro 18. Determinación de la evapotranspiración en la subcuenca del Río Piedras (estación San Lorenzo)**

mes	$t_j$ (°C)	$\left(\frac{t_j}{5}\right)^{1.514}$	$K_a$	$E_j$ (cm)
enero	12,59	4,05	0,9947	<b>5,13</b>
febrero	12,92	4,21	0,9089	<b>4,85</b>
marzo	12,62	4,06	1,03	<b>5,33</b>
abril	13,82	4,66	1,0321	<b>6,00</b>
mayo	13,60	4,55	1,0854	<b>6,18</b>
junio	13,66	4,58	1,0654	<b>6,11</b>
julio	13,54	4,52	1,0864	<b>6,16</b>
agosto	13,41	4,45	1,0743	<b>6,01</b>
septiembre	12,96	4,23	1,02	<b>5,46</b>
octubre	12,12	3,82	1,0179	<b>5,00</b>
noviembre	13,57	4,53	0,9747	<b>5,54</b>
diciembre	10,86	3,23	0,9814	<b>4,18</b>
I= 50,88				
a= 1,29				

**Cuadro 19. Determinación de la evapotranspiración en la estación Parque Tayrona**

mes	$t_j$ (°C)	$\left(\frac{t_j}{5}\right)^{1.514}$	$K_a$	$E_j$ (cm)
enero	22,55	9,78	0,9942	9,05
febrero	19,63	7,93	0,9088	5,88
marzo	20,95	8,75	1,03	7,83
abril	22,72	9,90	1,0323	9,57
mayo	23,16	10,18	1,0859	10,55
junio	22,30	9,62	1,0659	9,44
julio	20,90	8,72	1,0870	8,21
agosto	22,11	9,50	1,0747	9,32
septiembre	21,99	9,42	1,02	8,73
octubre	21,78	9,28	1,0177	8,50
noviembre	21,65	9,20	0,9742	8,03
diciembre	20,87	8,70	0,9806	7,38
I= 110,97				
a= 2,45				

Con estos datos de evapotranspiración mensual en San Lorenzo y Parque Tayrona se realiza la ponderación teniendo en cuenta que las áreas correspondientes equivalen al 29 % y 71 % respectivamente.

**Cuadro 20. Determinación de la evapotranspiración en la cuenca del Río Piedras (ponderación)**

mes	Evapotranspiración		Ponderación		E <sub>j</sub> (cm)
	San Lorenzo	Parque Tayrona	San Lorenzo	Parque Tayrona	
enero	5,13	9,05	1,48	6,44	<b>7,92</b>
febrero	4,85	5,88	1,39	4,19	<b>5,59</b>
marzo	5,33	7,83	1,53	5,58	<b>7,11</b>
abril	6,00	9,57	1,73	6,82	<b>8,54</b>
mayo	6,18	10,55	1,78	7,51	<b>9,29</b>
junio	6,11	9,44	1,76	6,72	<b>8,48</b>
julio	6,16	8,21	1,77	5,84	<b>7,62</b>
agosto	6,01	9,32	1,73	6,64	<b>8,37</b>
septiembre	5,46	8,73	1,57	6,22	<b>7,79</b>
octubre	5,00	8,50	1,44	6,06	<b>7,49</b>
noviembre	5,54	8,03	1,59	5,72	<b>7,31</b>
diciembre	4,18	7,38	1,20	5,26	<b>6,46</b>

## 6.4 HIDROGRAMA

La escorrentía superficial directa es el volumen de agua lluvia que hace su recorrido sin infiltrarse, desde el sitio donde cae hasta la corriente de agua que alimenta. La escorrentía superficial es uno de los fenómenos más importante desde el punto de vista de hidrológico, y consiste en la ocurrencia y el transporte de agua en la superficie terrestre.

De la precipitación que alcanza el suelo, parte queda retenida ya sea en depresiones o como

película en torno a partículas sólidas. Del excedente de agua retenida, parte se infiltra y parte escurre superficialmente. Se define como exceso de precipitación la precipitación total caída al suelo menos la retenida e infiltrada. Puede ocurrir que el agua infiltrada venga, posteriormente, a aflorar en la superficie como fuente de una nueva escorrentía superficial. La escorrentía superficial comprende el exceso de la precipitación que ocurre después de una lluvia intensa y se mueve libremente por la superficie del terreno, y la escorrentía de una corriente de agua, que puede ser alimentada tanto por el exceso de precipitación como por las aguas subterráneas.

Existen muchos factores que influyen sobre la escorrentía superficial que pueden ser de naturaleza climática (intensidad y duración de la precipitación, precipitación antecedente), fisiográfica (área y permeabilidad de la cuenca) y de naturaleza humana (obras hidráulicas construidas en la hoya y rectificación de ríos).

**6.4.1 Hidrograma Unitario de Williams y Hann:** A principios de la década del setenta, Jimmy R. Williams y Roy W. Hann propusieron un modelo para calcular el Hidrograma Unitario Sintético producido por una lluvia instantánea en una cuenca, a partir de sus principales características geomorfológicas, como son el área, la pendiente del canal principal y la relación largo-ancho. Las características geomorfológicas de la cuenca están representadas en el modelo mediante dos coeficientes, que son la constante de recesión  $K$  y el tiempo al pico,  $T_p$ .

El Hidrograma Unitario Sintético desarrollado por Williams y Hann puede expresarse en forma adimensional, dividiendo las abscisas y las ordenadas por el tiempo al pico  $t_p$  y el caudal pico,  $U_p$  respectivamente, aunque también pueden aplicarse con unidades de caudal  $U$  y tiempo  $t$ . Las ecuaciones propuestas por Williams y Hann para la determinación de la forma de su Hidrograma Unitario Sintético son las siguientes:

$$U = U_p \left( \frac{t}{T_p} \right)^{n-1} \exp \left[ (1-n) \left( \frac{t}{T_p} - 1 \right) \right] \quad \text{para } t \leq t_0$$

$$U = U_0 \exp\left(\frac{t_0 - t}{K}\right) \quad \text{para } t_0 < t \leq t_1$$

$$U = U_1 \exp\left(\frac{t_1 - t}{3K}\right) \quad \text{para } t > t_1$$

Según las tres ecuaciones anteriores el Hidrograma Unitario Sintético de Williams y Hann queda bien determinado de la siguiente manera: la primer ecuación es aplicable a la curva de concentración, es decir, hasta el punto de inflexión  $t_0$ , de la rama decreciente (ver Figura 18). La segunda y tercer ecuación conforman la curva de recesión. La segunda ecuación sólo es válida entre los puntos  $t_0$  y  $t_1$ , los cuales están separados una distancia igual a dos veces la constante de recesión ( $2K$ ), Figura 18.

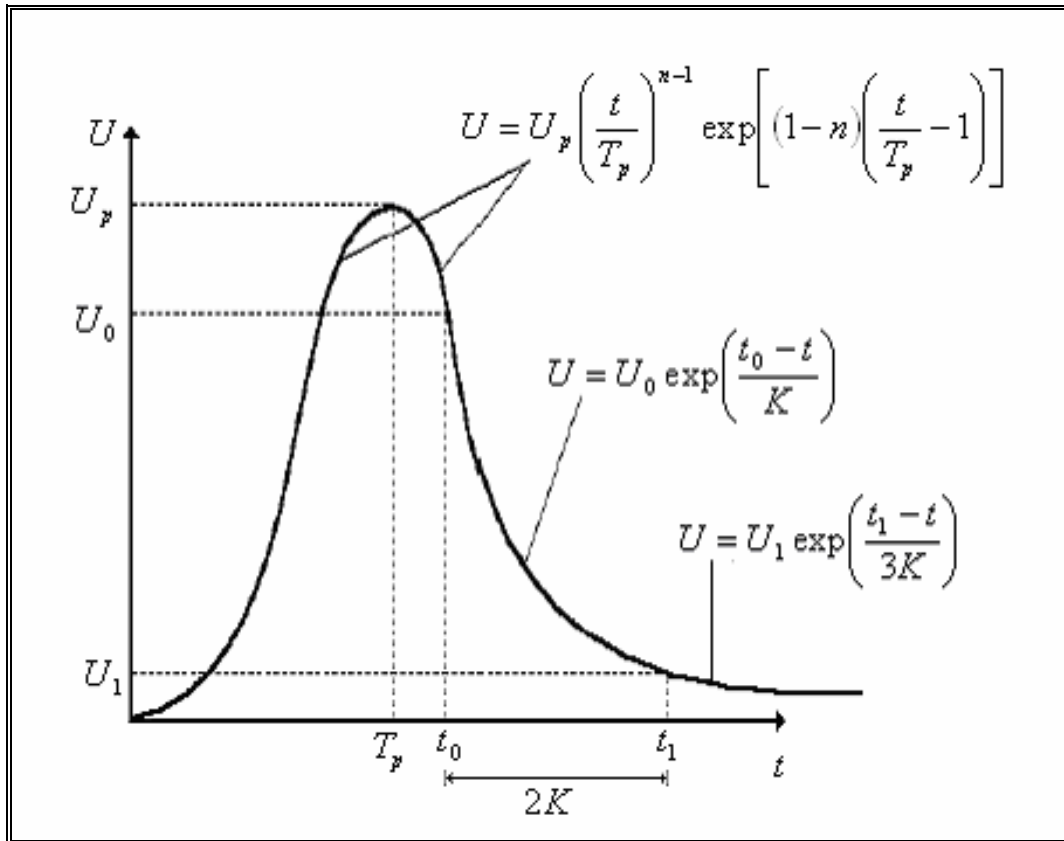


Figura 18. Curvas Hidrograma Unitario Instantáneo de Williams y Hann

**6.4.1.1 Parámetros K y T<sub>p</sub> del modelo:** En el modelo de Williams y Hann, los parámetros K y T<sub>p</sub> fueron determinados mediante análisis de regresión, realizados sobre una muestra de 34 cuencas localizadas en diversos lugares de los EE.UU., cuyas áreas oscilan entre 0.5 y 25 millas cuadradas. Dichos análisis arrojaron como resultado las siguientes ecuaciones:

$$K = 27.0 \times A_c^{0.231} \times S_{cp}^{-0.777} \times \left( \frac{L_c}{W_c} \right)^{0.124}$$

$$T_p = 4.63 \times A_c^{0.422} \times S_{cp}^{-0.46} \times \left( \frac{L_c}{W_c} \right)^{0.133}$$

donde:

A<sub>c</sub>: área de la cuenca en mi<sup>2</sup>

S<sub>cp</sub>: pendiente media del canal principal en pies/milla

L<sub>c</sub>/W<sub>c</sub>: relación largo ancho de la cuenca

K: constante de recesión en horas

T<sub>p</sub>: tiempo al pico en horas.

**6.4.1.2 Tiempos y Parámetros.** La determinación de los tiempos  $t_0$  y  $t_1$  y de los parámetros n y B es necesaria para la obtención del Hidrograma Unitario Sintético. Estos tiempos y parámetros fueron deducidos por Williams y Hann; las expresiones obtenidas son las siguientes:

$$t_0 = T_p \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{n-1}} \right)$$

El punto  $t_1$  está localizado a una distancia igual a dos veces la constante de recesión de la cuenca (2K), contada a partir de  $t_0$ , es decir:

$$t_1 = t_0 + 2K$$



En la literatura,  $n$  es conocido como el parámetro de forma del Hidrograma Unitario Sintético de Williams y Hann, y se puede encontrar con la siguiente expresión:

$$n = 1 + \left[ \frac{T_p}{2K} + \sqrt{\left( \frac{T_p^2}{4K^2} + \frac{T_p}{K} \right)} \right]^2$$

El coeficiente  $B$  actúa más como un parámetro de conversión de unidades que como un parámetro de significado físico. Se puede hallar resolviendo numéricamente una ecuación integral derivada por Williams y Hann. Sin embargo, el valor de  $B$  también se puede encontrar gráficamente en función de  $K$  y  $T_p$  usando una gráfica desarrollada por los mismos autores (Ver Anexo 21). Existe igualmente una gráfica para determinar el valor de  $n$ , en función también de  $K$  y  $T_p$ , pero en este caso se recomienda mejor usar la siguiente ecuación. El caudal pico se calcula como:

$$U_p = \frac{B \times A_c}{T_p}$$

donde:

$A_c$ : área de la cuenca en  $\text{mi}^2$

$T_p$ : tiempo al pico en horas

$B$ : parámetro de conversión

**6.4.1.3 Construcción del Hidrograma Unitario Sintético de Williams y Hann:** Para construir el Hidrograma Unitario Sintético de Williams y Hann, se siguen los siguientes pasos:

- Se calculan las constantes de recesión  $K$  y el tiempo al pico  $T_p$  como se indicó en el numeral 6.4.1.1
- Se calculan el parámetro  $n$  y el parámetro  $B$  usando el Anexo 21
- Se calculan el tiempo  $t_0$  y el tiempo  $t_1$
- Se calcula el caudal pico  $U_p$ , en  $\text{pie}^3/\text{s}$
- Se obtienen las ordenadas del Hidrograma Unitario Sintético  $U_t$ , reemplazando cada abscisa  $t$  en las ecuaciones de  $U$

El Hidrograma Unitario Instantáneo, tiene dimensiones de  $\text{pie}^3/\text{s}/\text{pulg}$  para los caudales y de horas para los tiempos.

**Cuadro 21. Datos para determinar el Hidrograma Unitario de la Cuenca y la Subcuenca del Río Piedras**

DATOS	Cuenca	Subcuenca
$A_c (\text{mi}^2)$	63.69	11.39
$S_{cp} (\text{pie}/\text{mi})$	198.49	523.66
$L_c (\text{Km})$	37.74	10.55
$W_c (\text{Km})$	6.80	5.00
$L_c/W_c$	5.55	2.11
$K (\text{h})$	1.43	0.40
$T_p (\text{h})$	2.94	0.80
$n$	3.80	3.73
$B$	368	360
$t_o (\text{h})$	4.70	1.29
$t_1 (\text{h})$	7.56	2.09
$U_p (\text{pie}^3/\text{s})$	7957.85	5122.67
$U_p (\text{m}^3/\text{s})$	8.87	5.71
$U_0 (\text{m}^3/\text{s})$	6.18	3.98
$U_1 (\text{m}^3/\text{s})$	0.84	0.54

Con estos parámetros se construye el Hidrograma Unitario de Williams y Hann para la cuenca teniendo en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$U = 8.87 \left( \frac{t}{2.94} \right)^{3.80-1} \exp \left[ (1-3.80) \left( \frac{t}{2.94} - 1 \right) \right] \quad \text{para } t \leq 4.70 \text{ h}$$

$$U = 6.18 \exp \left( \frac{4.70-t}{1.43} \right) \quad \text{para } 4.70 \text{ h} < t \leq 7.56 \text{ h}$$

$$U = 0.84 \exp \left( \frac{7.56-t}{3 \times 1.43} \right) \quad \text{para } t > 7.56 \text{ h}$$

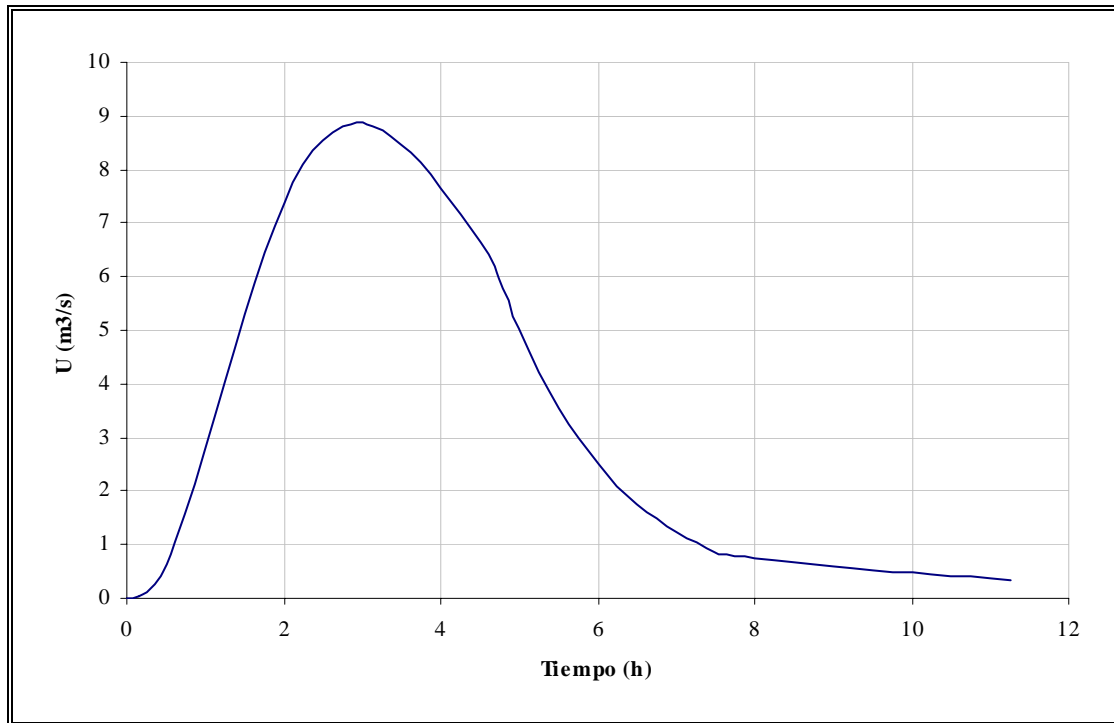
El Hidrograma Unitario de Williams y Hann para la subcuenca se construye teniendo en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$U = 5.71 \left( \frac{t}{0.80} \right)^{3.73-1} \exp \left[ \left( 1 - 3.73 \right) \left( \frac{t}{0.8} - 1 \right) \right] \quad \text{para } t \leq 1.29 \text{ h}$$

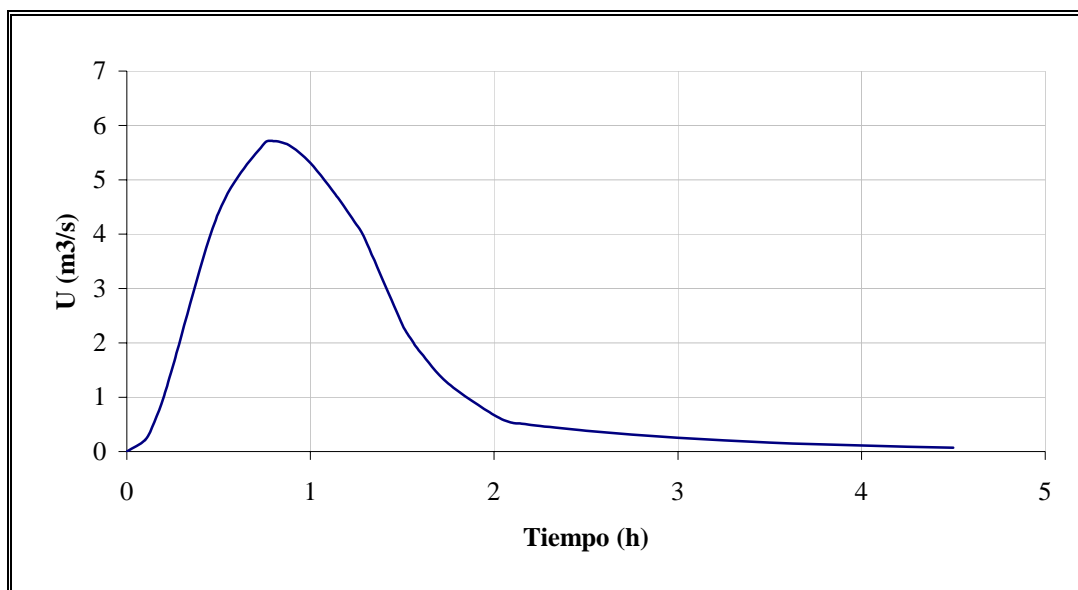
$$U = 3.98 \exp \left( \frac{1.29 - t}{0.40} \right) \quad \text{para } 1.29 \text{ h} < t \leq t_l \text{ 2.09 h}$$

$$U = 0.54 \exp \left( \frac{2.09 - t}{3 \times 0.40} \right) \quad \text{para } t > 2.09 \text{ h}$$

Los Hidrogramas Unitarios de la cuenca y la subcuenca se pueden observar en las Figuras 19 y 20 respectivamente.



**Figura 19. Hidrograma Unitario de la Cuenca del Río Piedras**



**Figura 20. Hidrograma Unitario de la Subcuenca del Río Piedras**

Cuando se requiere estimar los caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno, se pueden emplear varias metodologías siempre y cuando se disponga de registros hidrológicos. En el presente proyecto se presentan los caudales máximos obtenidos a partir de las lluvias extremas en diferentes períodos de retorno y en función de la tasa de evapotranspiración e infiltración promedio. Al estimar la esorrentía directa en milímetros que produce una precipitación, se pueden estimar los caudales circundantes por la corriente por medio del Hidrograma Unitario Instantáneo.

Estas precipitaciones extremas sólo pueden determinarse a través del análisis probabilístico y estadístico cimentado en los registros históricos. Una familia importante de distribuciones usadas en el análisis de frecuencia hidrológico es la distribución general de valores extremos, la cual ha sido ampliamente utilizada para representar el comportamiento de crecientes y sequías, y entre estas las más usada es la distribución Gumbel, que además, al aplicarle las pruebas de bondad de ajuste resultó ser la más conveniente.

Con los valores máximos mensuales de precipitación en 24 horas registrados en la zona de evaluación se calcularon las precipitaciones efectivas teniendo en cuenta una

evapotranspiración promedio del 50%, una infiltración del 15% y asumiendo que el 30% de la lluvia total que cae en 24 horas se presenta en una hora (Oliveros, 1996).

Para el cálculo de las precipitaciones extremas, aplicando la distribución Gumbel, se empleó el software Hidrobas.

Los resultados del cálculo de los caudales en los distintos periodos de retorno a partir de sus respectivas precipitaciones, se compararan con los obtenidos a partir de aplicarle la distribución Gumbel a los caudales aforados en la estación la Revuelta. Ver Cuadro 21.

**Cuadro 22. Comparación de los posibles caudales máximos en la cuenca del Río Piedras**

Periodo de Retorno	Caudal Máx. (m <sup>3</sup> /s)		Error
	Calculado a partir de las precipitaciones	Proyectando los caudales aforados	
5	145,5	143,0	1,71%
10	177,0	175,3	0,98%
25	216,9	216,1	0,37%
50	246,5	246,4	0,04%
100	275,8	276,5	0,23%

## 7. MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA Y SUBCUENCA DEL RÍO PIEDRAS

En el afán de caracterizar hidrológicamente la cuenca del río piedras se hace necesario estimar la disponibilidad promedio de agua en el río para así comparar éstos resultados con los registro obtenidos por el IDEAM en las estaciones de aforo. Para alcanzar tal propósito se utilizará el modelo denominado abcd, que es un modelo no lineal de balance hídrico que toma como datos de entrada la precipitación y la evapotranspiración potencial, y da como resultado el flujo en el cauce. Internamente el modelo representa también la capacidad de almacenamiento del suelo, el almacenamiento subterráneo, el escurrimiento directo, el aporte del almacenamiento Subterráneo al cauce y la evapotranspiración actual. Fue introducido originalmente por Thomas (1981) y Thomas *et al.* (1983) como una estructura de modelo conveniente para su utilización en el manejo de recursos hídricos a nivel regional, utilizando una escala de tiempo anual. Más tarde el modelo abcd fue comparado con numerosos modelos de balance mensual por Alley (1984 y 1985) y Vandewiele *et al.* (1992), mostrándose eficaz en comparación con los otros modelos.

El parámetro **a** puede ser interpretado como la posibilidad de escurrimiento antes de que el suelo se encuentre completamente saturado. Para obtener una buena calibración regional este parámetro puede variar en cada cuenca.

El parámetro **b** es el límite superior para la suma de la evapotranspiración y el almacenamiento de agua en el suelo. Para la calibración se relacionó este parámetro con la evapotranspiración potencial media de Thornthwaite y el valor de agua disponible de cada cuenca mediante dos coeficientes  $K_{ETP}$  y  $K_{AD}$  de modo que el valor de  $b$  para cada cuenca es:

$$b = K_{ETP} \times ETP_O + K_{AD} \times AD$$

El parámetro **c**, que distribuye el escurrimiento superficial y el almacenamiento de agua subterránea se calibra en cada cuenca. Este parámetro puede además contener a los posibles errores de medición de caudales, precipitaciones y evapotranspiraciones.

El recíproco del parámetro  $d$  puede ser interpretado como el tiempo medio de residencia del agua subterránea en la cuenca. Dicho parámetro puede ser relacionado con el coeficiente de recesión, pero dado el tamaño de la cuenca se toma este parámetro constante e igual a 1.

El modelo abcd de Thomas se basa en la combinación de las siguientes ecuaciones:

$$W_t = P_t - S_{t-1}$$

$$Y_t = E_t - S_t$$

$$Y_t = \frac{W_t + b}{2a} - \sqrt{\left(\frac{W_t + b}{2a}\right)^2 - \frac{W_t b}{a}}$$

$$S_t = Y_t e^{-\frac{PE_t}{b}}$$

$$G_t = G_{t-1} + c(W_t - Y_t) - dG_t$$

$$Q_t = (1 - c)(W_t - Y_t) + dG_t$$

donde:

$W_t$ : agua existente en el mes t.

$Y_t$ : oportunidad de evapotranspiración en el mes t.

$S_{t-1}$ : almacenamiento del suelo al comienzo del mes t.

$S_t$ : almacenamiento del suelo al final del mes t.

$PE_t$ : evapotranspiración potencial.

$G_t$ : almacenamiento de aguas subterráneas al final del mes t.

$Q_t$ : suma del escurrimiento directo y la descarga de aguas subterráneas.

Cuadro 23. Datos para determinar la modelación hidrológica de la cuenca del Río Piedras

Mes	Precipitación media (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	Precipitación Efectiva (mm)	$W_t$ (mm)	b	$Y_t$ (mm)	$S_t$ (mm)	$G_t$ (mm)	$Q_t$ (m <sup>3</sup> /s)
enero	26,55	73,45	49,94	9,94	149,05	166	136,6	87,82	72,71	3,94
febrero	30,76	54,19	54,19	13,03	118,59	126	106,9	69,59	41,93	2,29
marzo	29,14	67,56	55,12	11,82	98,73	155	95,6	61,77	22,44	1,21
abril	122,88	80,01	58,47	97,15	184,65	211	170,4	116,70	17,97	1,00
mayo	188,53	86,24	50,19	161,41	305,23	246	231,2	162,75	44,15	2,57
junio	135,03	79,77	58,03	108,95	297,78	215	205,5	141,71	65,91	3,79
julio	133,12	73,02	67,97	107,09	274,82	200	190,8	132,35	72,84	4,14
agosto	184,09	78,76	60,43	157,04	316,44	228	218,4	154,65	82,99	4,73
septiembre	259,43	73,12	49,74	231,54	414,08	240	234,0	172,57	127,03	7,31
octubre	313,03	70,00	37,95	284,78	485,59	250	245,5	185,63	177,57	10,19
noviembre	238,16	69,39	35,53	210,46	423,79	225	220,5	162,03	185,36	10,51
diciembre	146,63	60,44	46,13	120,27	308,66	177	172,4	122,50	133,55	10,11

a	d	Ketp	AD (mm)
0,98	1	2,15	100

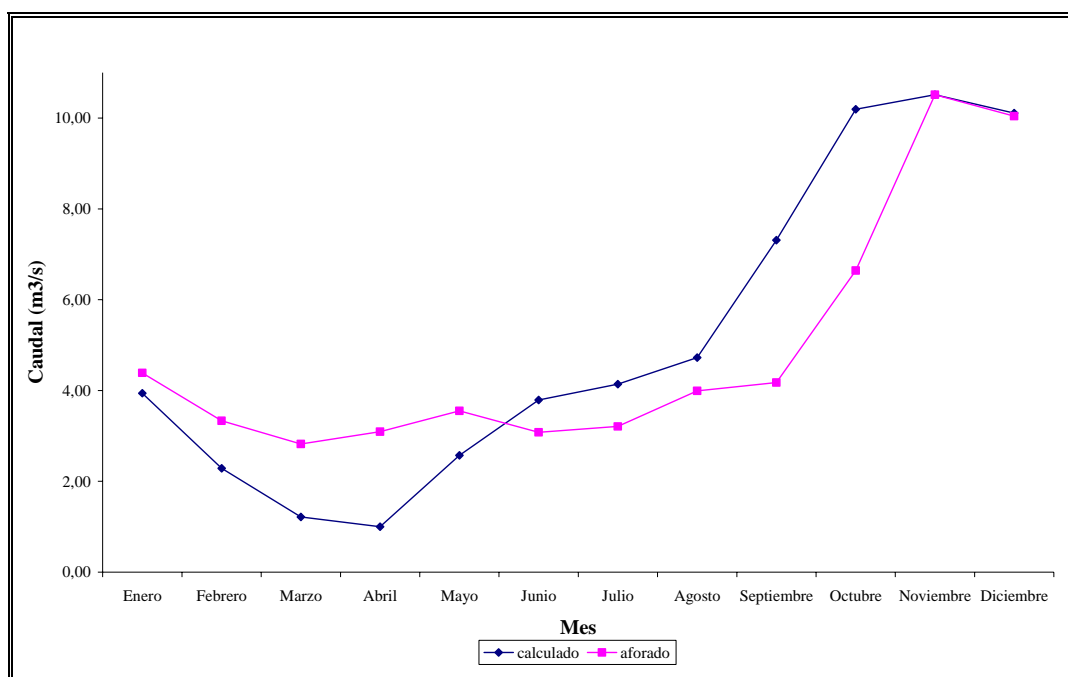


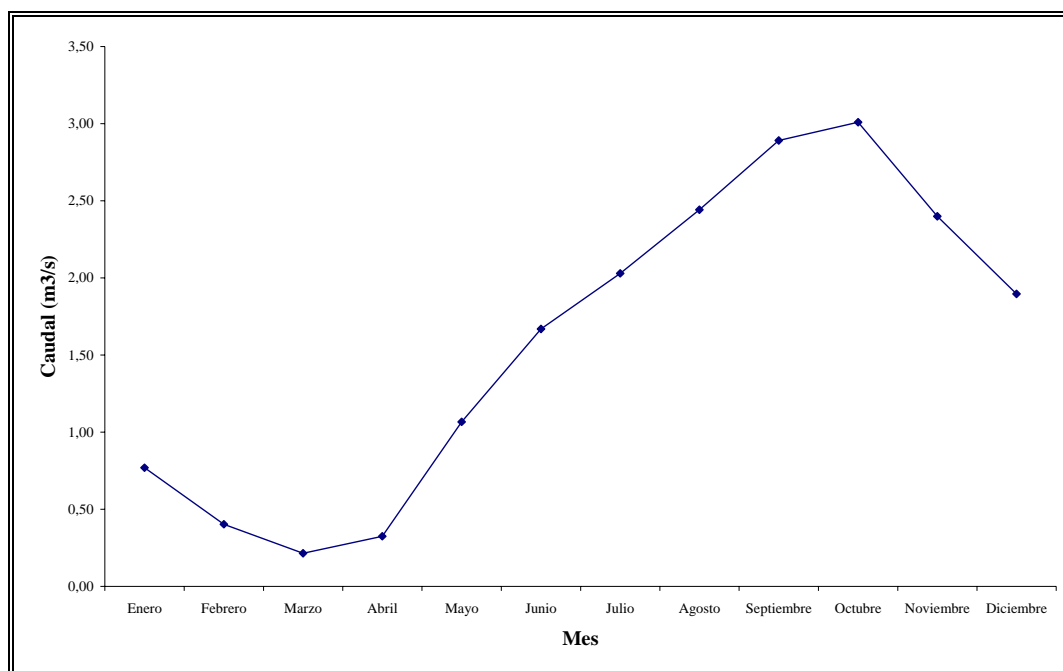
Figura 21. Modelación hidrológica de la cuenca del Río Piedras aplicando el método abcd de Thomas



**Cuadro 24. Datos para determinar la modelación hidrológica de la subcuenca del Río Piedras**

Mes	Precipitación media (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	Precipitación Efectiva (mm)	$W_t$ (mm)	b	$Y_t$ (mm)	$S_t$ (mm)	$G_t$ (mm)	$Q_t$ (m <sup>3</sup> /s)
enero	16,24	51,28	34,87	9,94	97,31	115	90,53	57,89	82,76	0,77
febrero	25,40	48,46	48,46	13,03	83,29	111	79,33	51,30	43,26	0,40
marzo	31,97	53,27	43,46	11,82	83,27	123	80,27	52,11	23,05	0,21
abril	152,31	60,03	43,87	97,15	204,42	171	159,45	112,19	32,89	0,33
mayo	281,50	61,83	35,98	161,41	393,69	210	205,50	153,09	105,83	1,07
junio	299,33	61,06	44,42	108,95	452,42	213	209,61	157,41	168,25	1,67
julio	315,33	61,56	57,31	107,09	472,74	219	215,10	162,32	206,51	2,03
agosto	371,39	60,09	46,11	157,04	533,71	231	227,49	175,36	248,71	2,44
septiembre	409,75	54,62	37,15	231,54	585,11	230	226,74	178,74	294,58	2,89
octubre	365,28	49,96	27,09	284,78	544,02	207	204,94	161,07	308,35	3,01
noviembre	213,88	55,39	28,36	210,46	374,95	178	174,59	127,82	249,34	2,40
diciembre	102,41	41,80	31,90	120,27	230,23	118	115,57	81,08	159,07	1,90

a	d	Ketp	AD (mm)
0,98	1	2,15	100

**Figura 22. Modelación hidrológica de la subcuenca del Río Piedras aplicando el método abcd de Thomas**

## **8. MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL RÍO PIEDRAS CON EL PROGRAMA HIDROSIG JAVA**

### **8.1 ALIMENTACIÓN DEL PROGRAMA**

HIDROSIG es un sistema de información geográfico (SIG) para la estimación, despliegue, análisis y consulta interactiva de las variables más importantes del ciclo hidrológico, tales como precipitación, evaporación potencial y real y escurrimiento, tanto a nivel anual como mensual. Está conformado, al igual que todos los programas bajo Windows, por un conjunto de controles que permiten manipular la visualización y búsqueda de la información. El programa ha sido desarrollado en el lenguaje IDL (Interactive Data Language), un lenguaje de programación que ofrece gran versatilidad, pues vincula rutinas de análisis estadístico, herramientas de información geográfica y programación de ventanas interactivas con un lenguaje bastante intuitivo (similar a Fortran), lo que permite la implementación de software que se adapta a las necesidades de problemas particulares como es el caso de la evaluación Hidrológica de la cuenca del Río Piedras.

El objetivo principal del programa es convertirse en una herramienta de consulta versátil y fácil de manejar en todos los proyectos en los que se requieran conocer las características climáticas e hidrológicas de una región, su potencial hídrico y/o sus características topográficas. HIDROSIG está diseñado para dar al usuario un amplio menú de posibilidades de búsqueda de la información hidrológica.

En HIDROSIG existen dos clases de mapas: los modelos digitales de terreno (MDT) y las variables hidrológicas (VHC). Los primeros describen la variación espacial de la altura sobre el nivel del mar del terreno, y los segundos muestran la distribución del resto de variables de interés en el estudio hidroclimatológico. Además, cada tipo de mapa tiene formas distintas de visualización y herramientas especializadas de análisis.

Ambos tipos de mapas comparten la misma extensión de archivo .metaHSJ para el archivo de encabezado que contiene información acerca de la matriz de datos como filas, columnas,

georeferenciación, entre otras. Sin embargo la diferencia fundamental a nivel de archivos es que un MDT se forma por el archivo de encabezado y un archivo de extensión .mdt.HSJ y una variable hidrológica (VHC) se conforma por el archivo de encabezado y un archivo .anual.HSJ que contiene la información promedio anual o si se tiene información de tipo ciclo anual de caudales se tienen también los archivos para cada uno de los meses con extensión .enero.HSJ, .febrero.HSJ, etc.

Los archivos de mapas pueden ser abiertos de dos formas, ya sea desde una base de datos disponible o desde un archivo en disco como se puede también para todo tipo de objeto en HIDROSIG. Como no existe una base de datos de la cuenca del Río Piedras es preciso crear todas las variables empezando por el MDT. Para esto se necesita tener un archivo que contenga la grilla del terreno, es decir, una lista de datos que tenga las coordenadas X, Y y Z de todos los puntos digitalizados. Por lo tanto se procesó la información cartográfica de la siguiente manera: El archivo de digitalización de las curvas de nivel en AUTOCAD (\*.dwg) se transformó, desde el mismo programa, en un archivo con extensión dxf (drawing interchange format), es decir en un formato de archivo ASCII o binario empleado por los archivos de dibujo de AUTOCAD para exportar o importar archivos a y de otras aplicaciones. Luego, usando el programa DXF2XYZ 2.0, se pasó el archivo de \*.dxf a \*.xyz con lo cual fue posible crear la grilla en el programa SURFER 7 guardando inicialmente el archivo de datos \*.xyz como una hoja de cálculo \*.xls, (Excel Spreadsheet). Teniendo la hoja de cálculo en la base de datos del SURFER se creó la grilla (\*.grd) asignando una columna de la tabla a cada coordenada X, Y y Z y determinando el espacio entre cada línea de la grilla y el número de líneas de la misma. El método que se empleó fue Kriging ya que es el más recomendado por sus buenos resultados en la mayoría de los datos xyz. Para que el HIDROSIG reconozca correctamente la grilla de datos ésta debe guardarse en SURFER como archivo tipo ASCII (American Standard Code for Information Interchange) con extensión .grd, código numérico empleado en la transmisión de datos por ordenador. Dicho código asigna significado a 128 números, haciendo uso de siete bits por carácter y utilizando el octavo bit para la comprobación de paridad. Ahora sí, se importó el archivo SURFER GRD desde HIDROSIG. Para que el programa realice los cálculos geomorfológicos es necesario utilizar la Herramienta de Proyección que transforma las coordenadas planas a latitud y longitud, utilizando como coordenadas de origen el datum Bogotá. Finalmente se procesó el MDT de modo que ya se

tiene la geomorfología de la cuenca del Río Piedras en la base de datos del programa HIDROSIG.

## 8.2 RESULTADOS

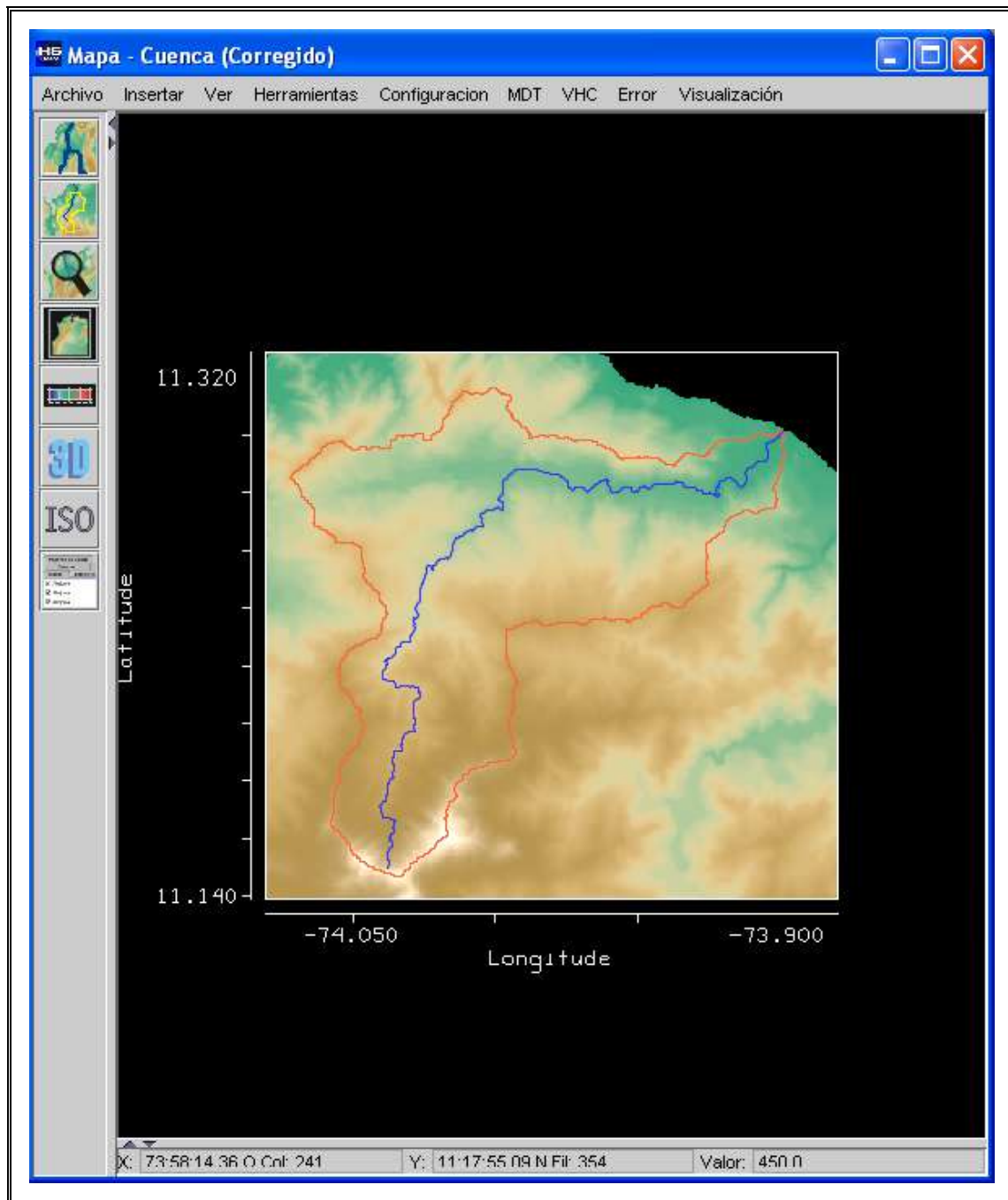


Figura 23. MDT procesado en HIDROSIG con el Río Piedras y su cuenca trazados.

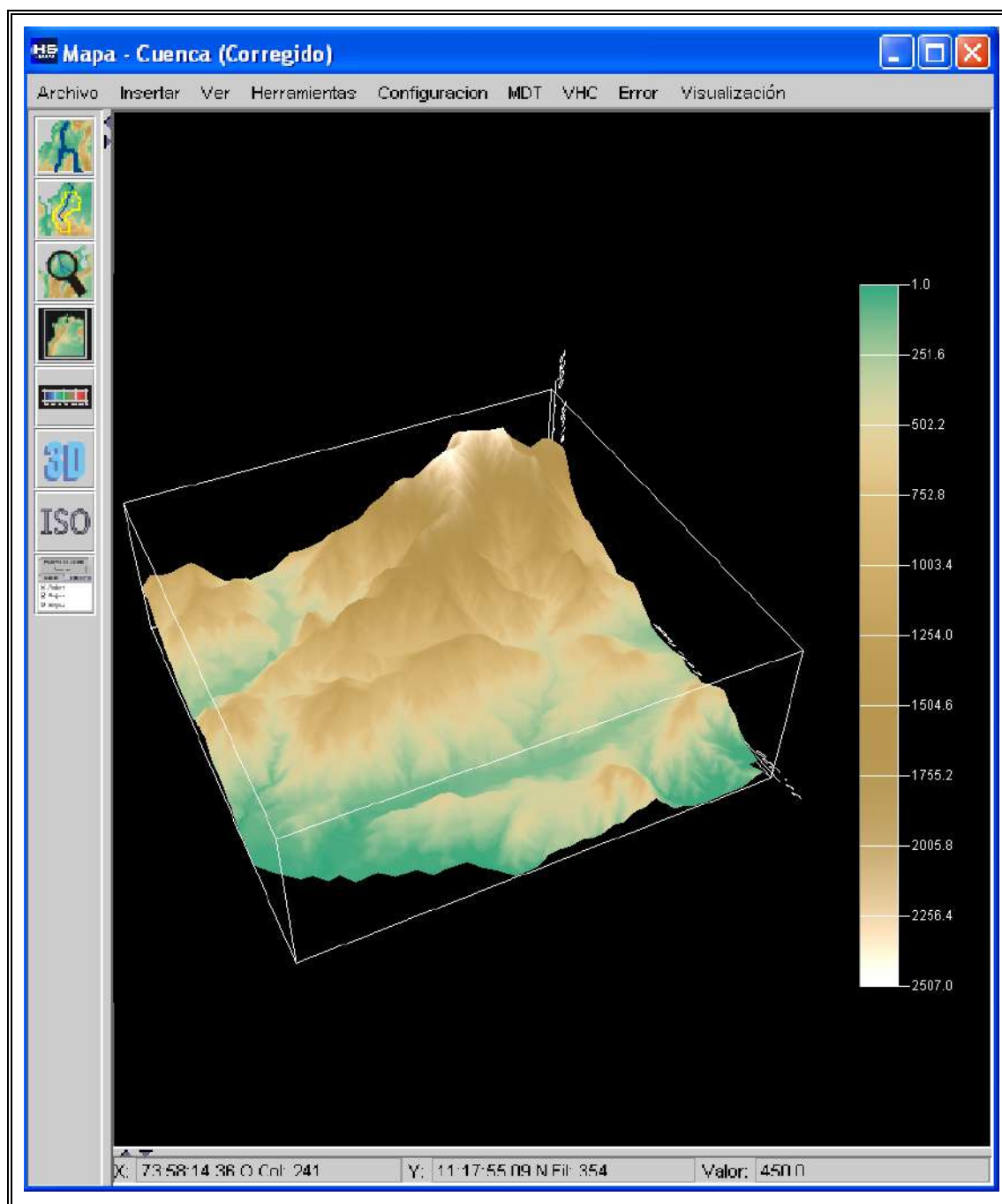


Figura 24. Cuenca del Río Piedras en tres dimensiones generada por HIDROSIG

Para ingresar la precipitación y la evapotranspiración se siguió el mismo procedimiento explicado anteriormente, ingresando tanto las isoyetas como las isolíneas de evapotranspiración mes a mes y anual. En las Figuras 25, 26, 27 y 28 se observan los mapas de precipitación total mensual multianual y total anual multianual y en las Figuras 29, 30, 31 y 32 los mapas de evapotranspiración total mensual multianual y total anual multianual de la cuenca del Río Piedras.

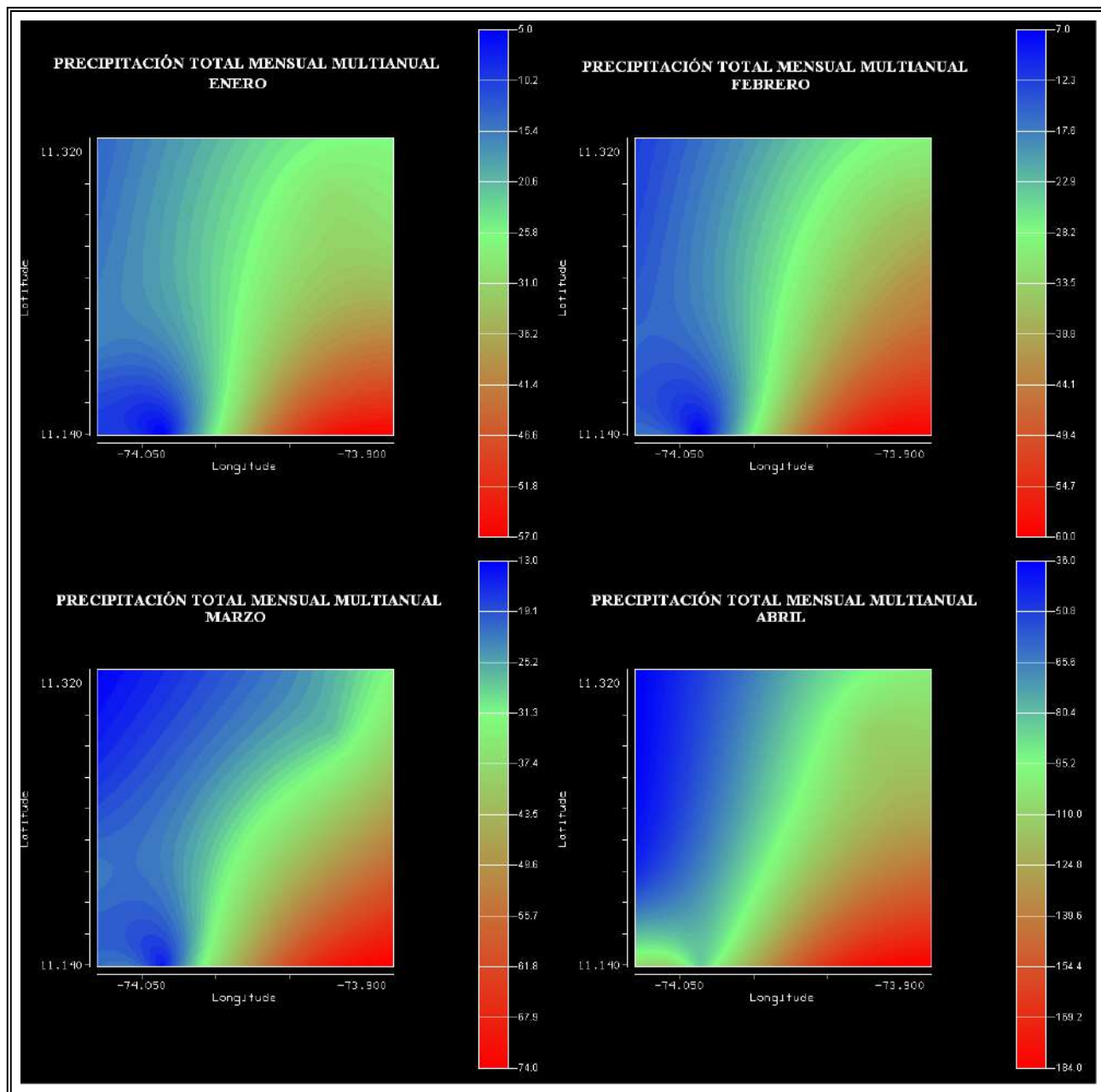


Figura 25. Mapas de precipitación total mensual multianual de los meses enero, febrero, marzo y abril

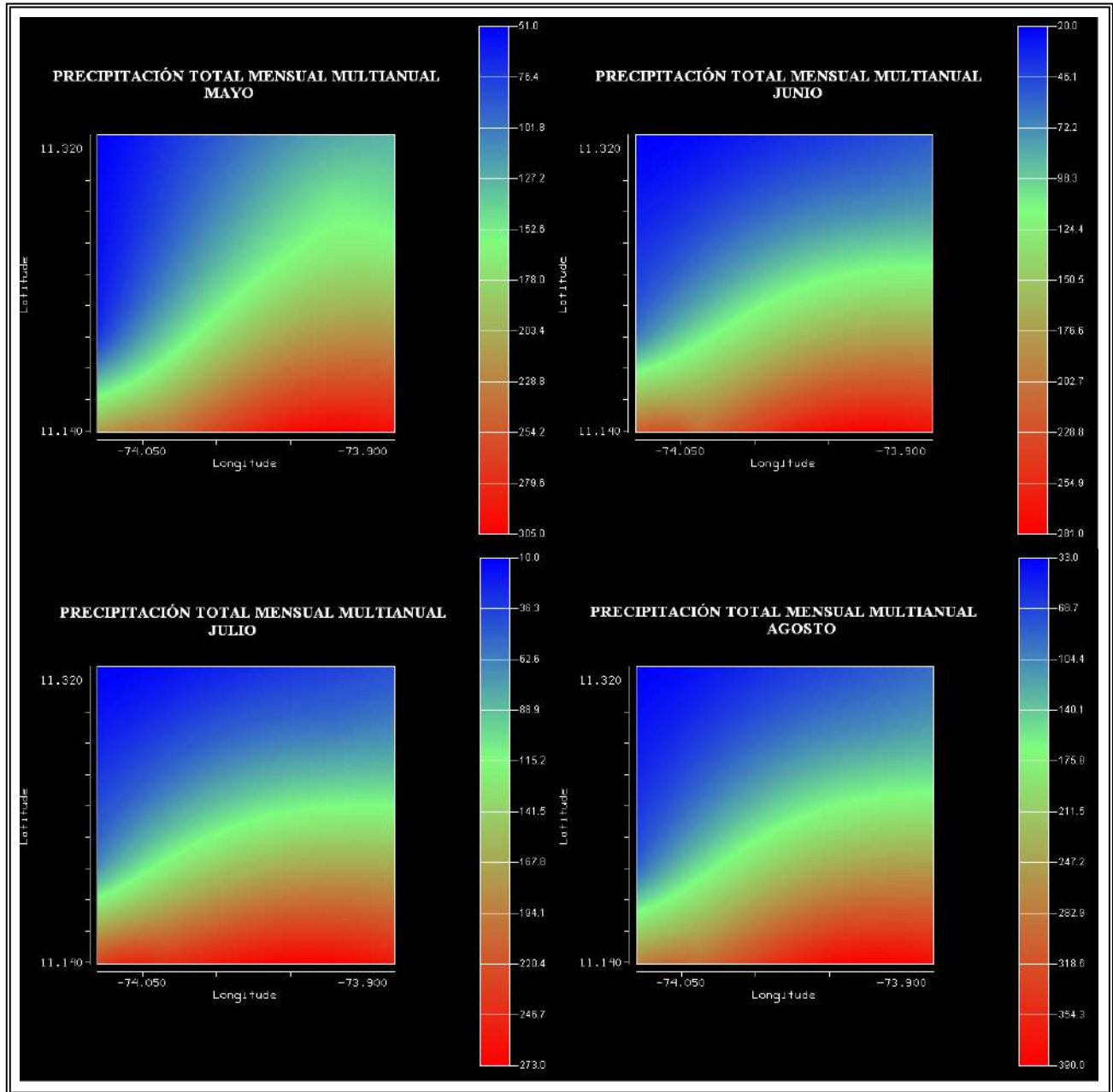


Figura 26. Mapas de precipitación total mensual multianual de los meses mayo, junio, julio y agosto



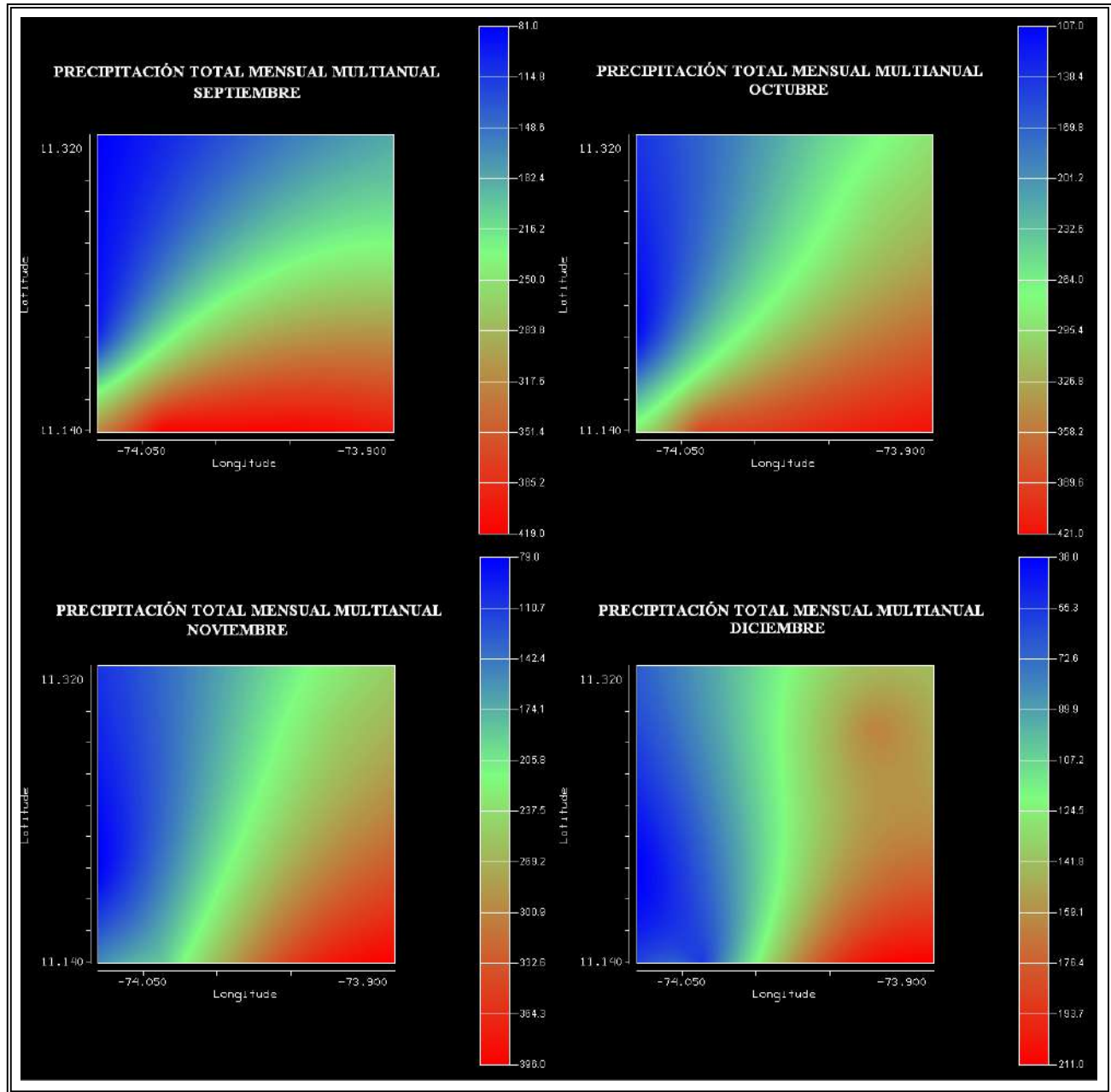


Figura 27. Mapas de precipitación total mensual multianual de los meses septiembre, octubre, noviembre y diciembre



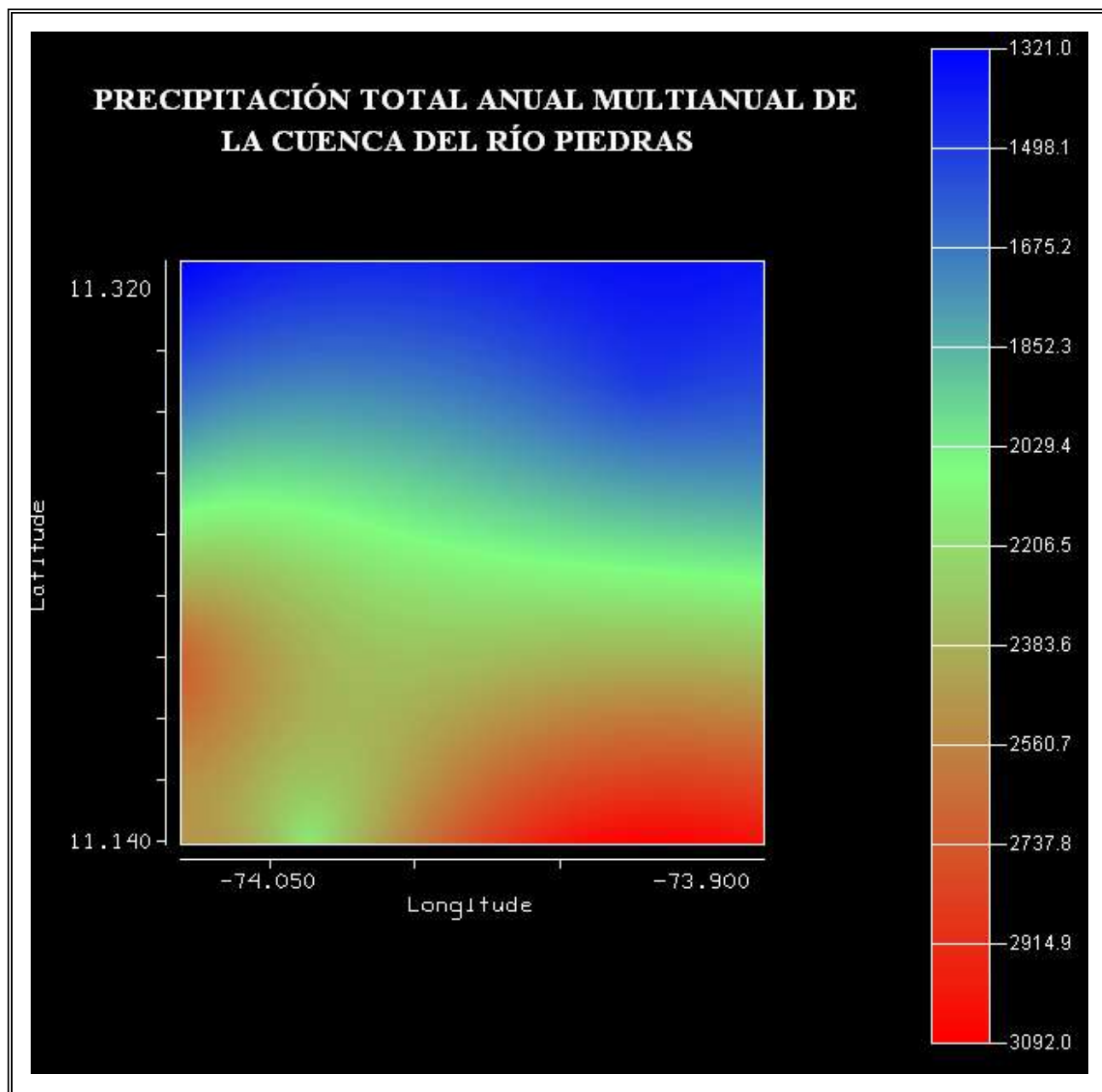


Figura 28. Mapa de precipitación total anual multianual de la cuenca del Río Piedras

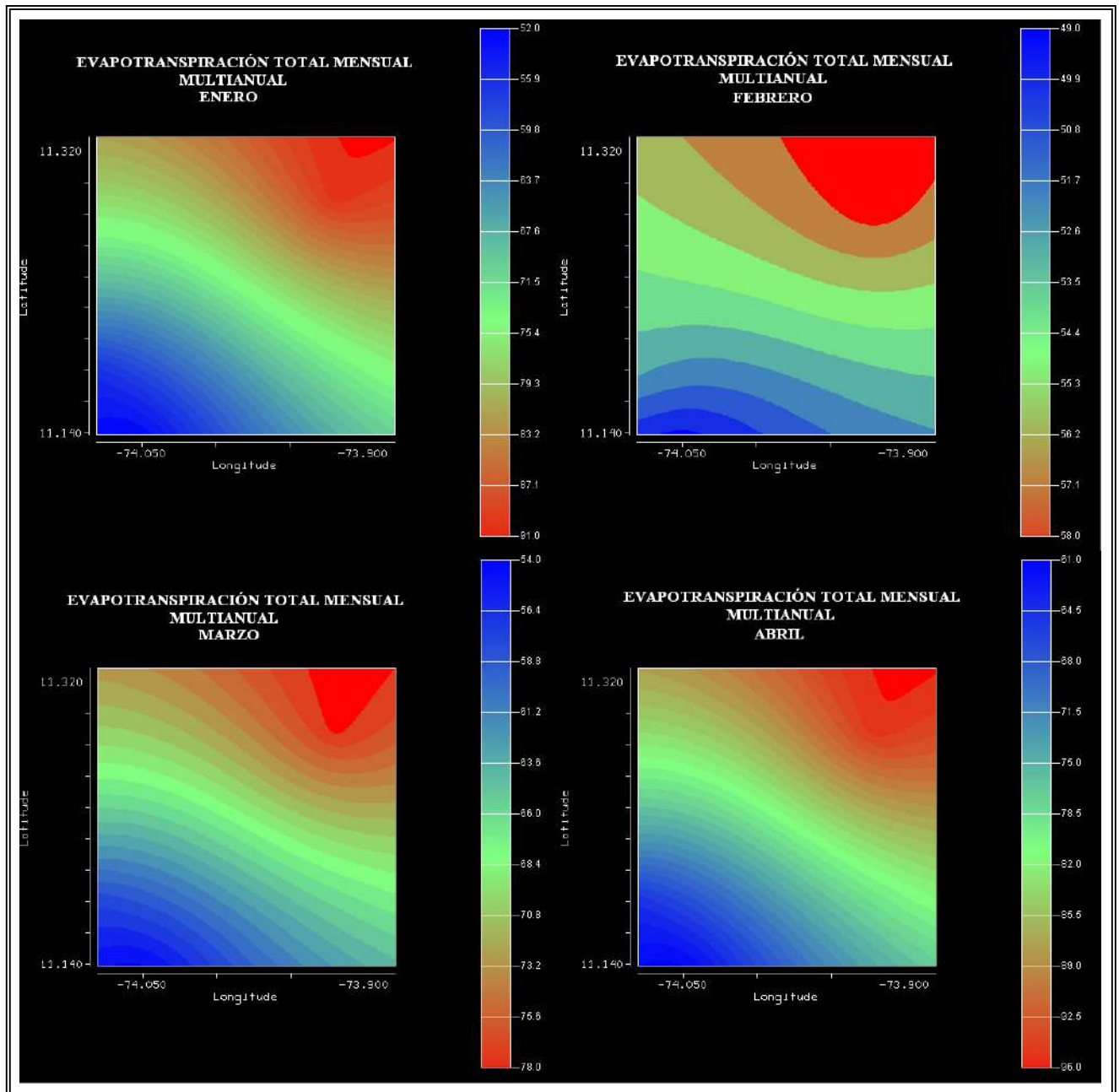


Figura 29. Mapas de evapotranspiración total mensual multianual de los meses enero, febrero, marzo y abril

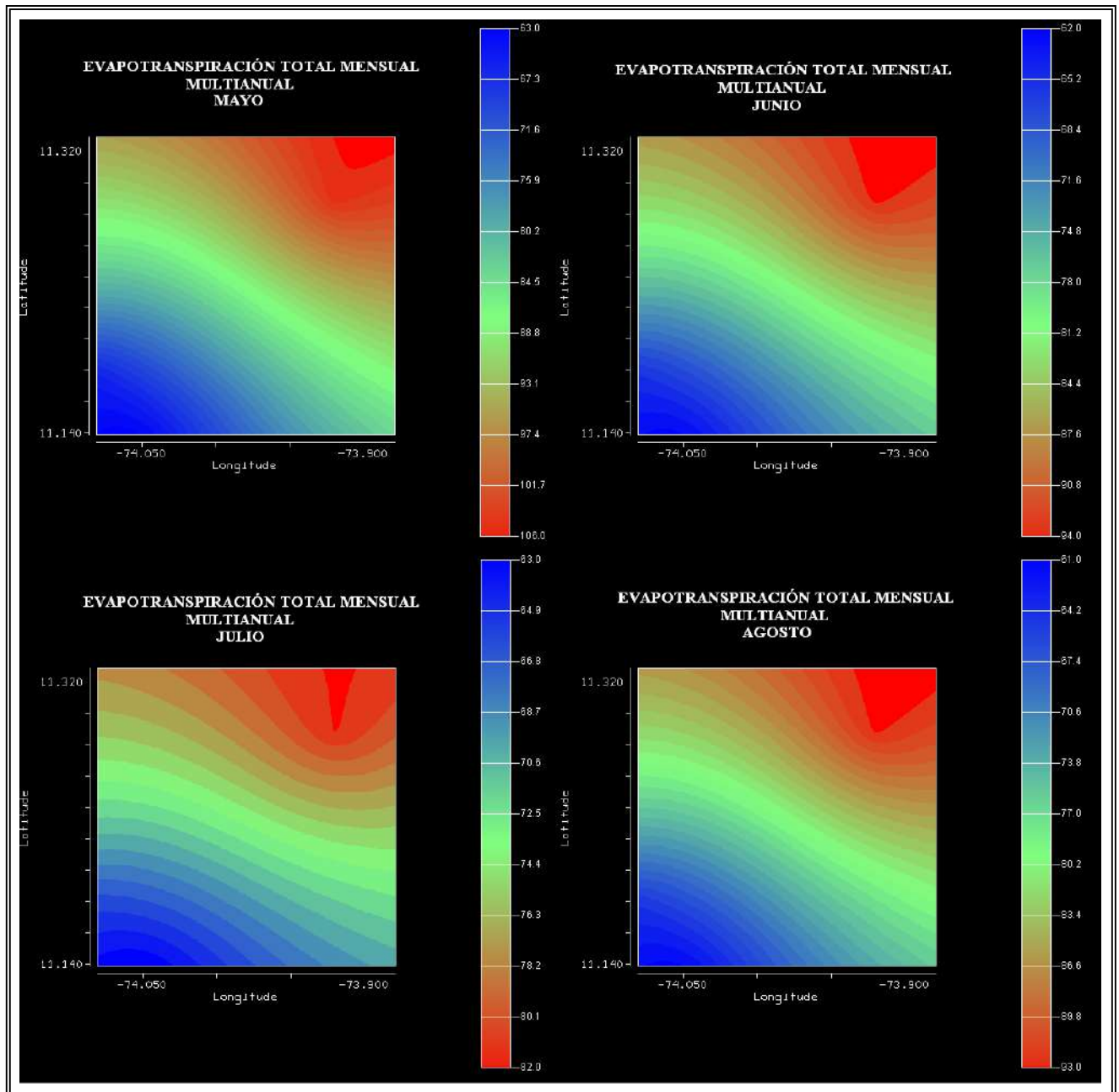


Figura 30. Mapas de evapotranspiración total mensual multianual de los meses mayo, junio, julio y agosto

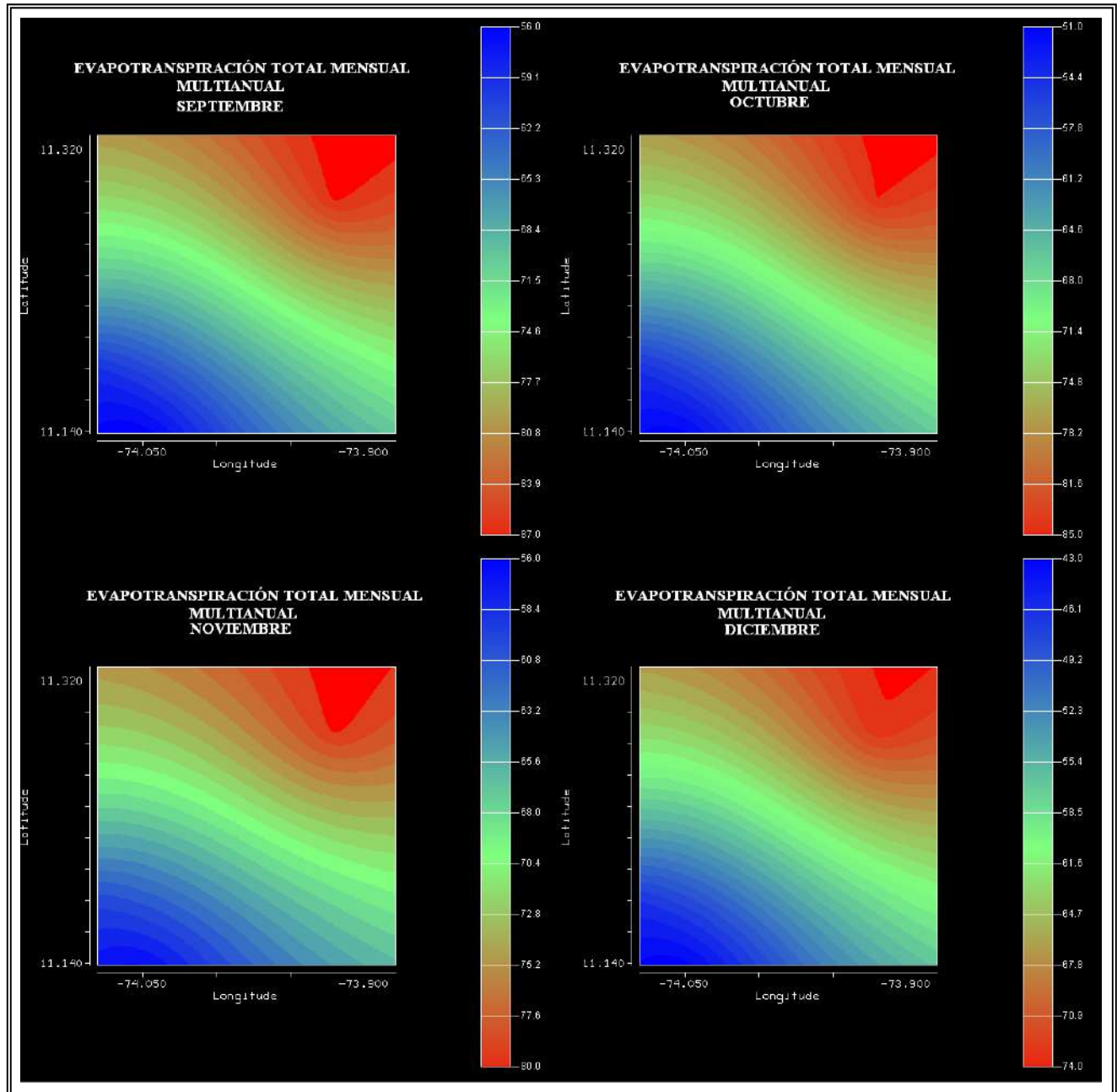


Figura 31. Mapas de evapotranspiración total mensual multianual de los meses septiembre, octubre, noviembre y diciembre

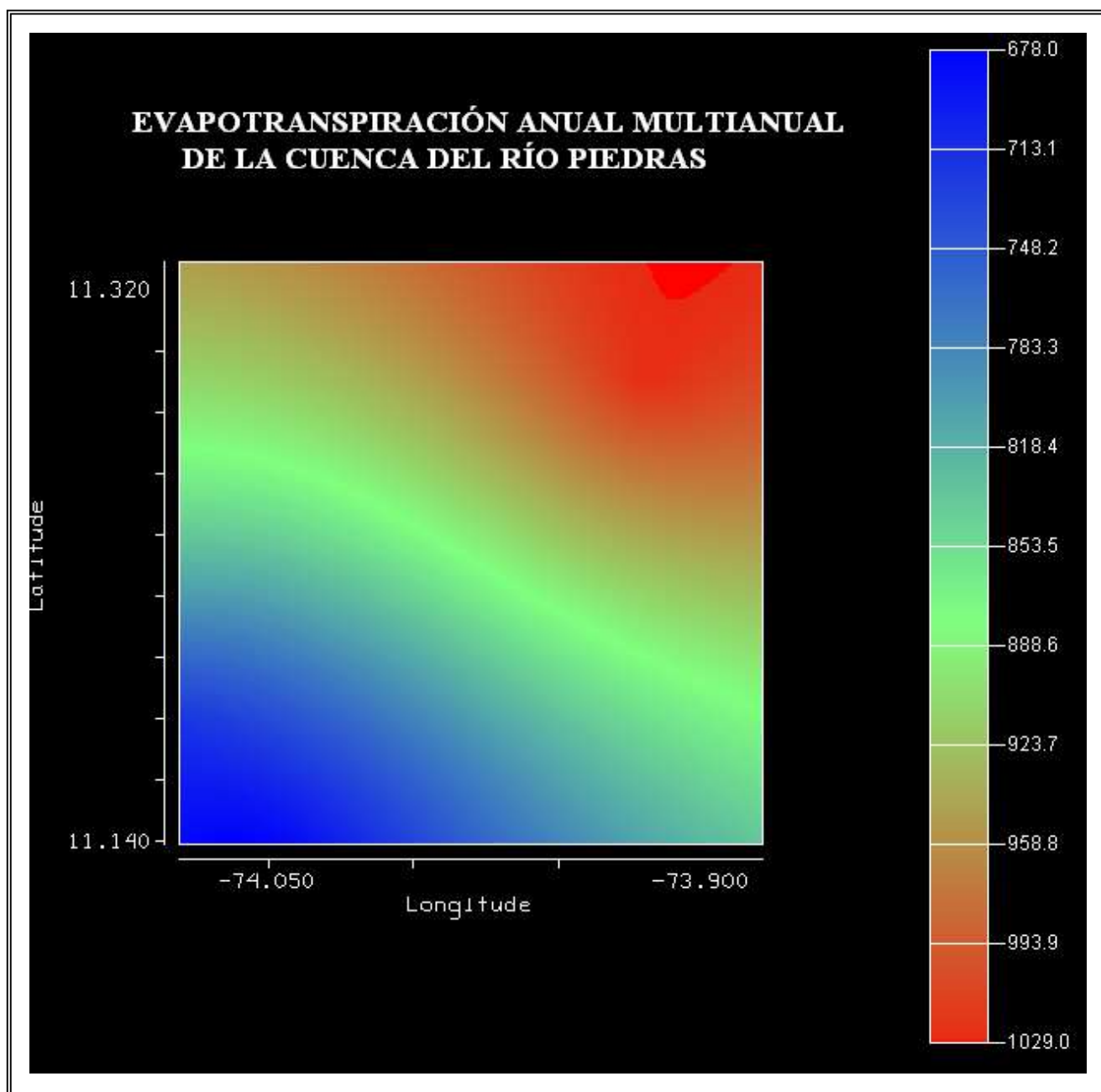


Figura 32. Mapa de evapotranspiración total anual multianual de la cuenca del Río Piedras

Luego de procesar la información el programa calculó la precipitación y evapotranspiración total anual multianual, el área de la cuenca, la curva hipsométrica, el caudal medio, la escorrentía superficial, y demás características de las cuencas. En el cuadro 23 se hace una comparación entre los resultados arrojados por el programa y los calculados.

**Cuadro 25. Comparación de los resultados calculados y arrojados por HIDROSIG**

	Cuenca		Subcuenca	
	Calculado	HIDROSIG	Calculado	HIDROSIG
Área (Km <sup>2</sup> )	157,3	157,93	29,39	29,51
Pendiente media de la cuenca (%)	38,33	36,56	65,12	58,48
Perímetro (Km)	75,60	93,36	23,20	26,78
Longitud del cauce (Km)	37,65	39,25	10,50	11,42
Orden de Horton	5	5	3	3
Precipitación total anual multianual (mm)	1958,8	1960,01	2361,5	2358,94
Evapotranspiración total anual multianual (mm)	918	917,33	659	727,48
Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)	5,15	5,22	1,59	1,53
Escorrentía Superficial (mm)	136,5	135,57	160,6	160,73

Las diferencias en la longitud del cauce y el perímetro se deben a que se calcularon de forma bidimensional sobre el plano digitalizado mientras que HIDROSIG las determina teniendo en cuenta la variación de la elevación.

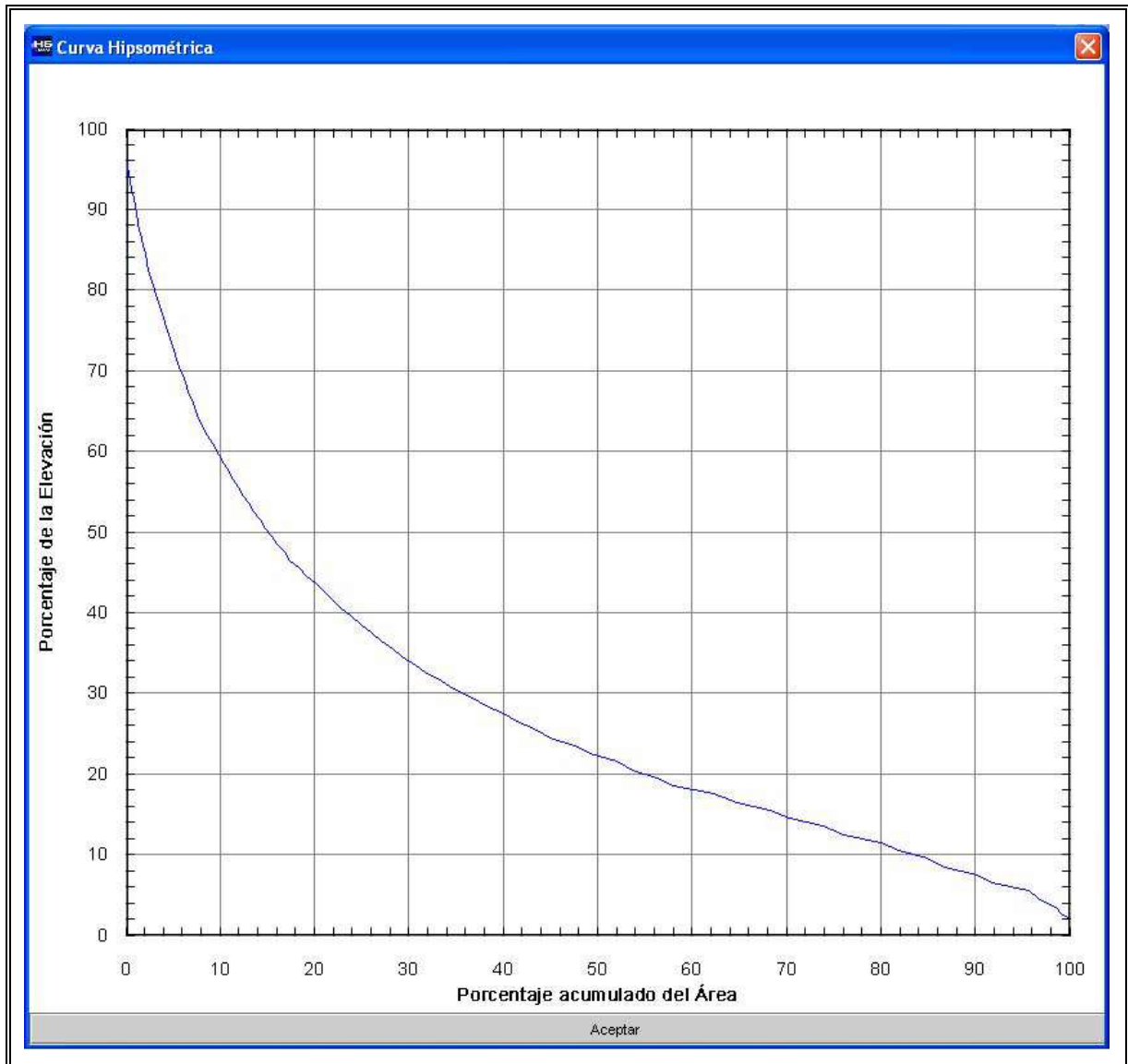


Figura 33. Curva Hipsométrica de la cuenca de Río Piedras calculada por HIDROSIG

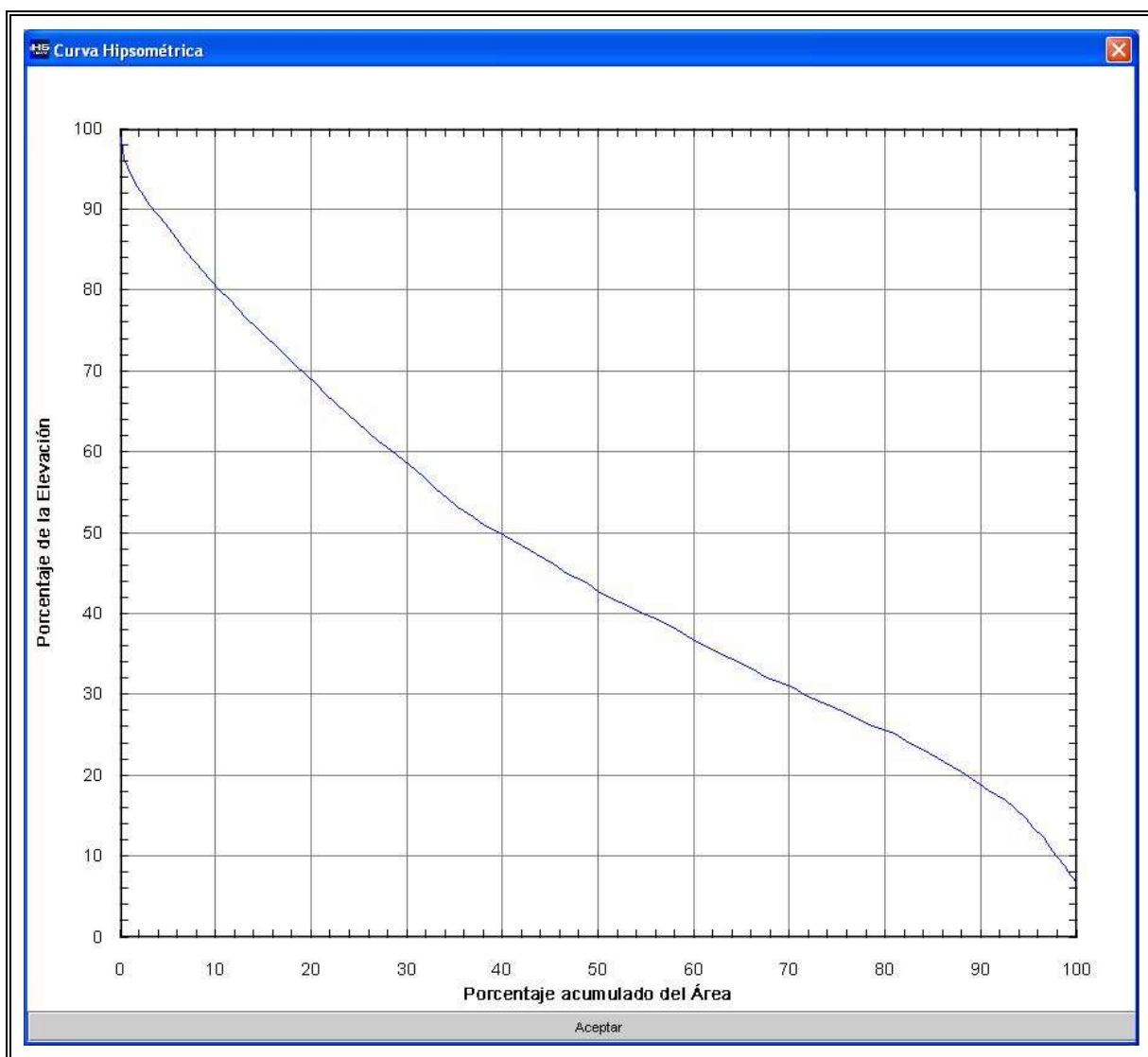


Figura 34. Curva Hipsométrica de la subcuenca de Río Piedras calculada por HIDROSIG



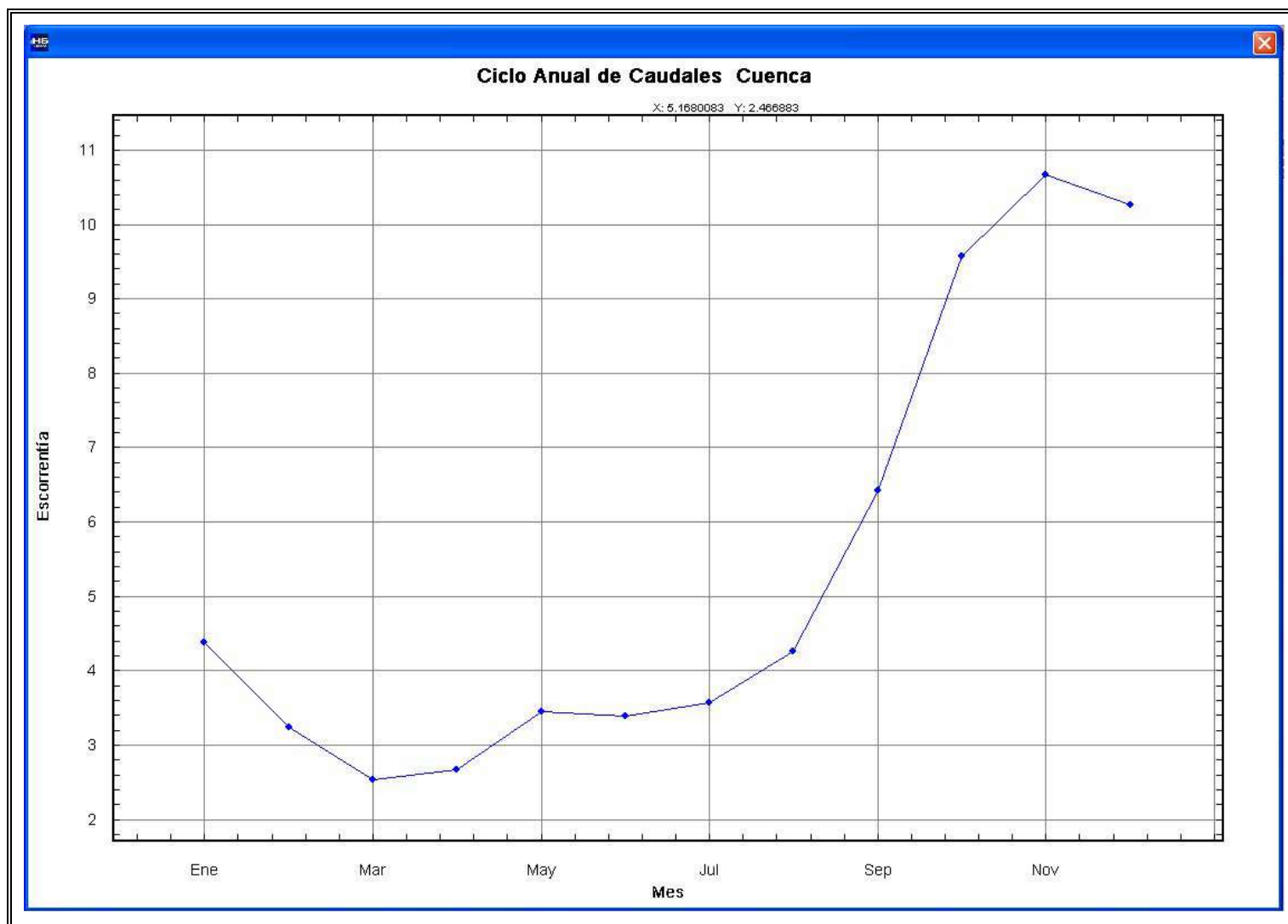


Figura 35. Ciclo anual de caudales de la cuenca calculado por HIDROSIG

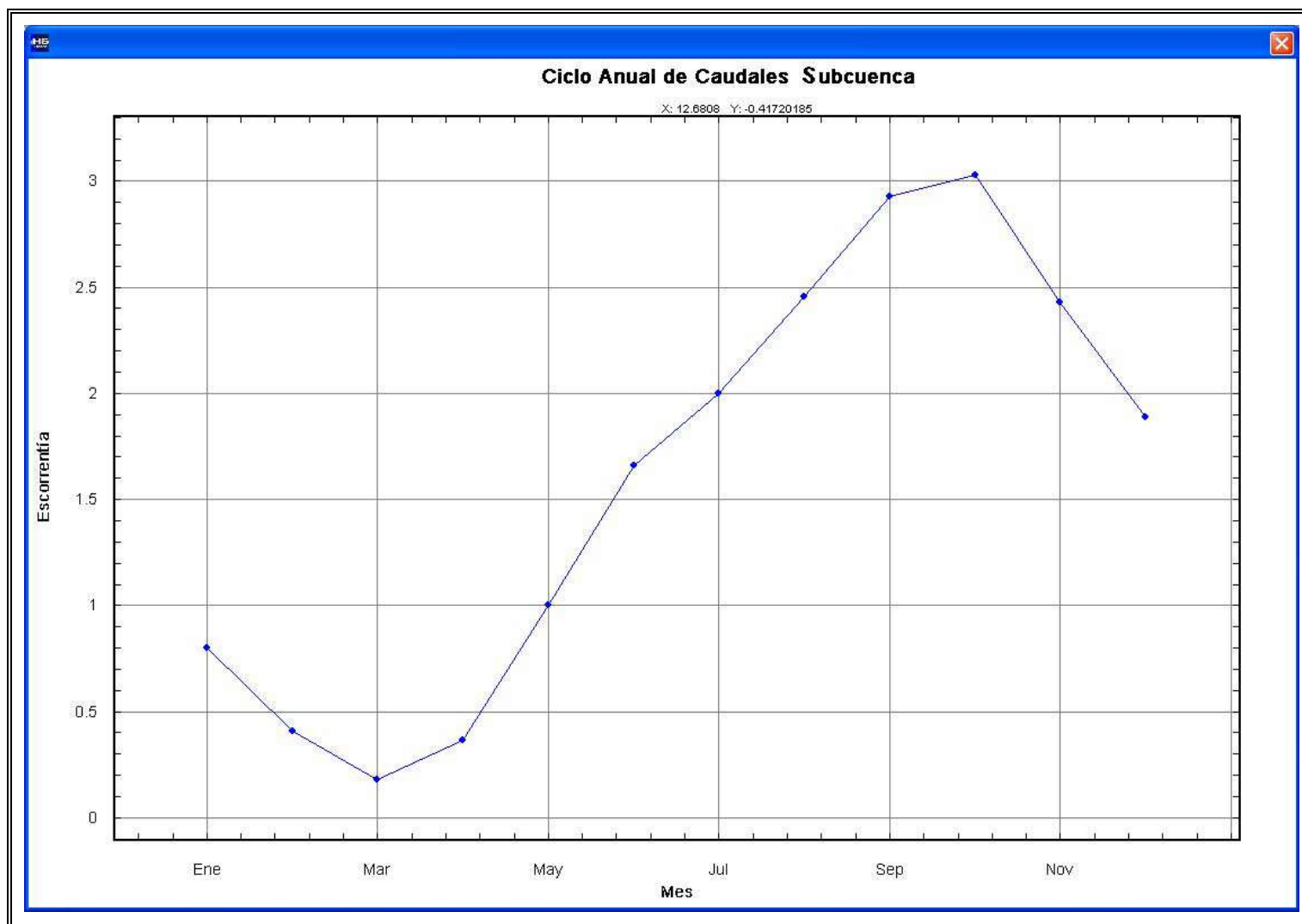


Figura 36. Ciclo anual de caudales de la subcuenca de Río Piedras calculado por HIDROSIG

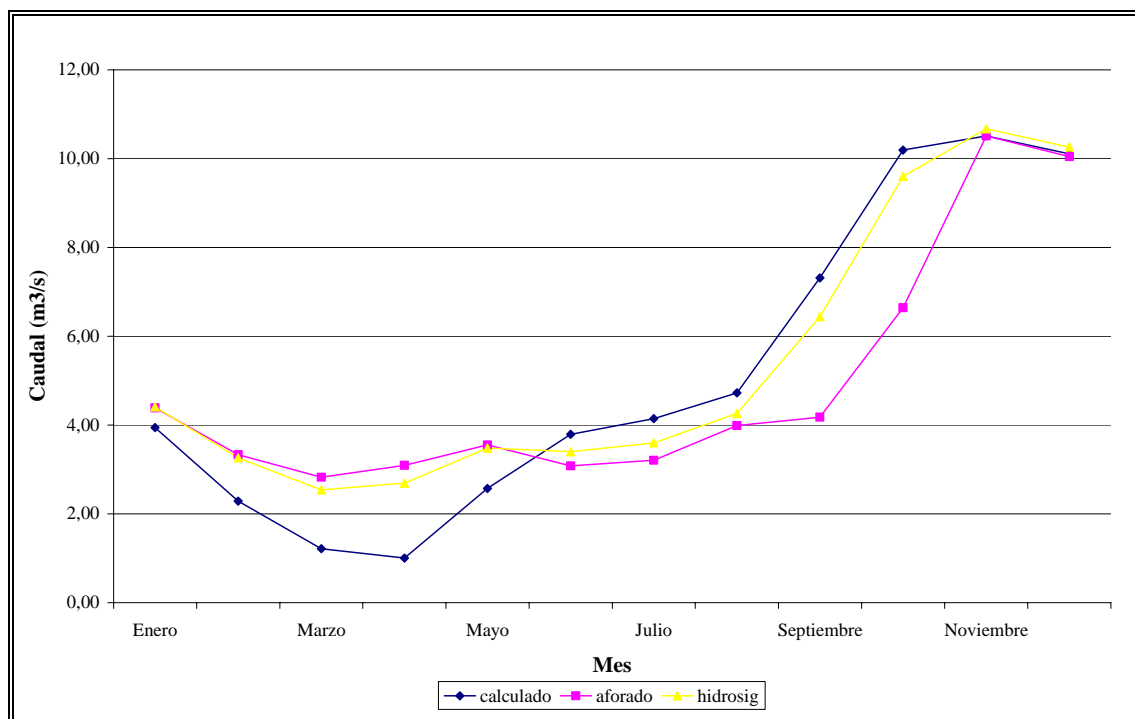


Figura 37. Comparación de las modelaciones hidrológicas de la cuenca de Río Piedras

Cuadro 26. Comparación de las modelaciones hidrológicas de la cuenca de Río Piedras

Mes	Caudal (m <sup>3</sup> /s)		
	Aforado	Calculado	HidroSIG
enero	4,39	3,94	4,41
febrero	3,33	2,29	3,26
marzo	2,82	1,21	2,54
abril	3,09	1,00	2,69
mayo	3,55	2,57	3,48
junio	3,08	3,79	3,4
julio	3,21	4,14	3,6
agosto	3,99	4,73	4,26
septiembre	4,18	7,31	6,44
octubre	6,64	10,19	9,6
noviembre	10,51	10,51	10,67
diciembre	10,04	10,11	10,26

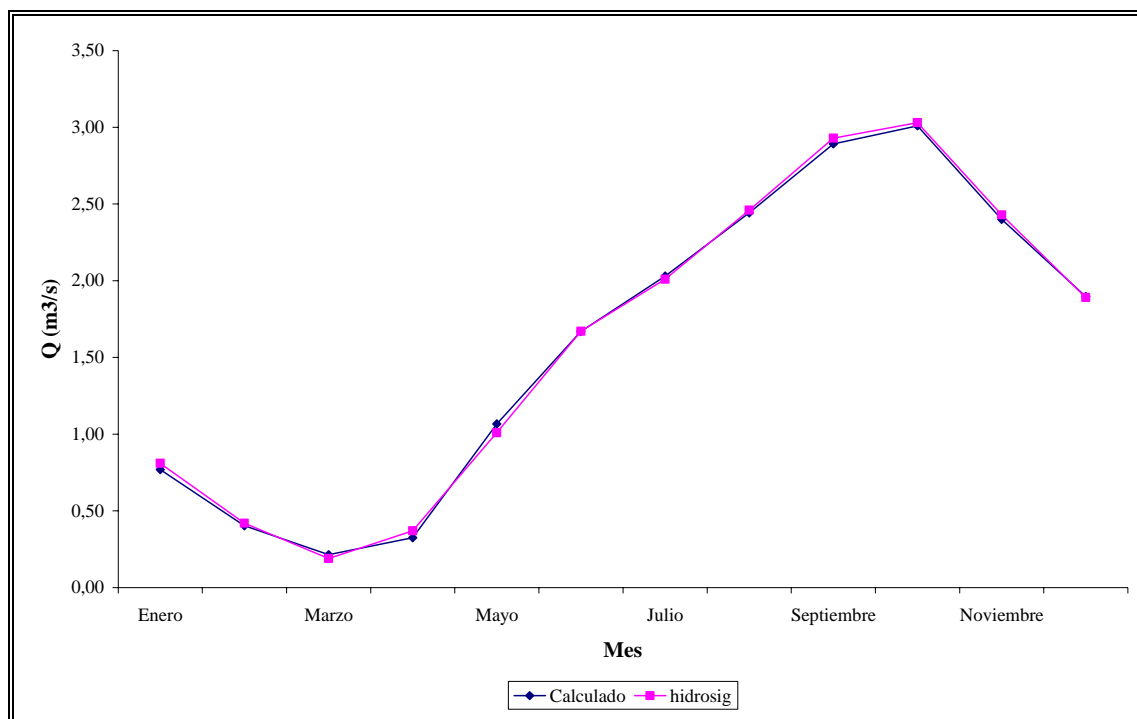


Figura 38. Comparación de las modelaciones hidrológicas de la subcuenca de Río Piedras

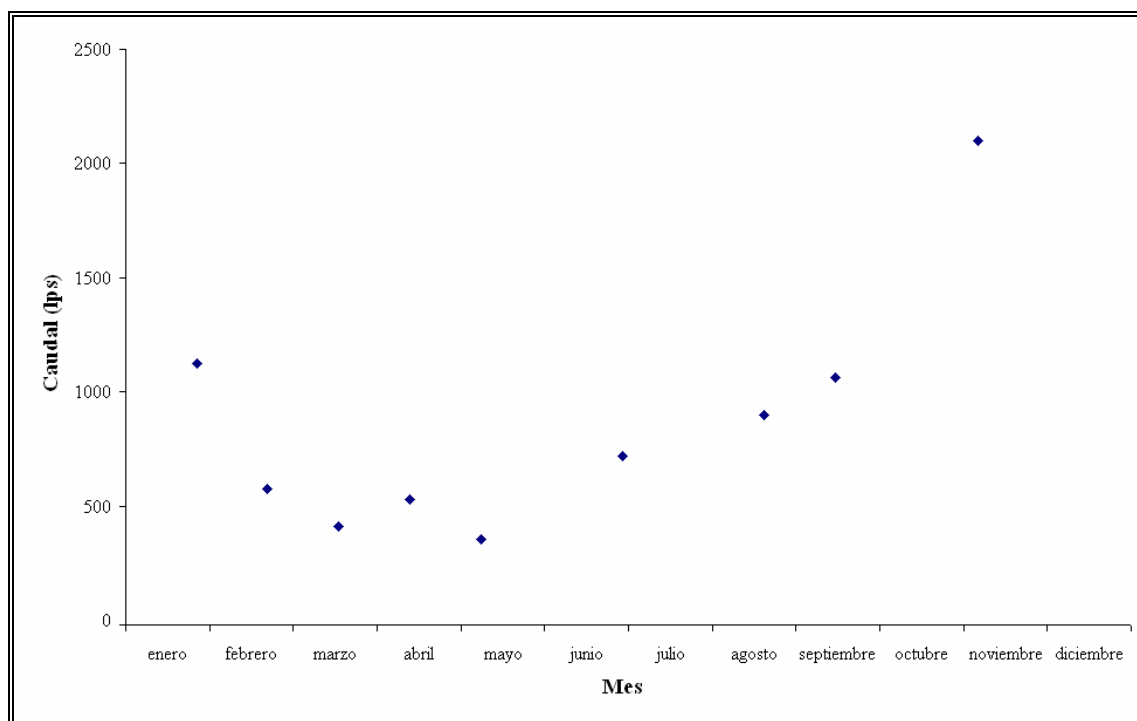
Cuadro 27. Comparación de las modelaciones hidrológicas de la subcuenca de Río Piedras

Mes	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	
	Calculado	HidroSIG
enero	0,77	0,81
febrero	0,40	0,42
marzo	0,21	0,19
abril	0,33	0,37
mayo	1,07	1,01
junio	1,67	1,67
julio	2,03	2,01
agosto	2,44	2,46
septiembre	2,89	2,93
octubre	3,01	3,03
noviembre	2,40	2,43
diciembre	1,90	1,89

Desafortunadamente no se cuenta con una serie histórica de aforos continuos que permitan realizar una distribución de caudales en la subcuenca, pero los pocos datos existentes, aunque son muy aislados, dejan entrever el comportamiento de los caudales mostrando una tendencia clara de empezar disminuyéndose en los primeros tres meses el año, aumentando gradualmente hasta alcanzar sus valores máximos en los últimos cuatro meses.

**Cuadro 28. Aforos a la altura de la captación de l acueducto distrital de Santa Marta  
Fuente Metroagua S.A. E.S.P.**

Día	Mes	Año	Caudal aforado en el Río Piedras a la altura de la captación (lps)	Caudal aforado en el Canal de conducción de Metroagua (lps)
5	diciembre	2001	3147	415
23	enero	2002	1126	265
27	febrero	2002	691	370
4	abril	2002	511	383
24	abril	2002	675	348
5	septiembre	2002	897	315
4	diciembre	2002	1050	423
14	febrero	2003	459	362
26	marzo	2003	365	-
28	marzo	2003	459	362
11	abril	2003	398	373
14	mayo	2003	352	-
1	julio	2004	721	437
6	octubre	2004	1064	396



**Figura 39.** Representación gráfica de los aforos del Río Piedras a la altura de la captación del acueducto distrital

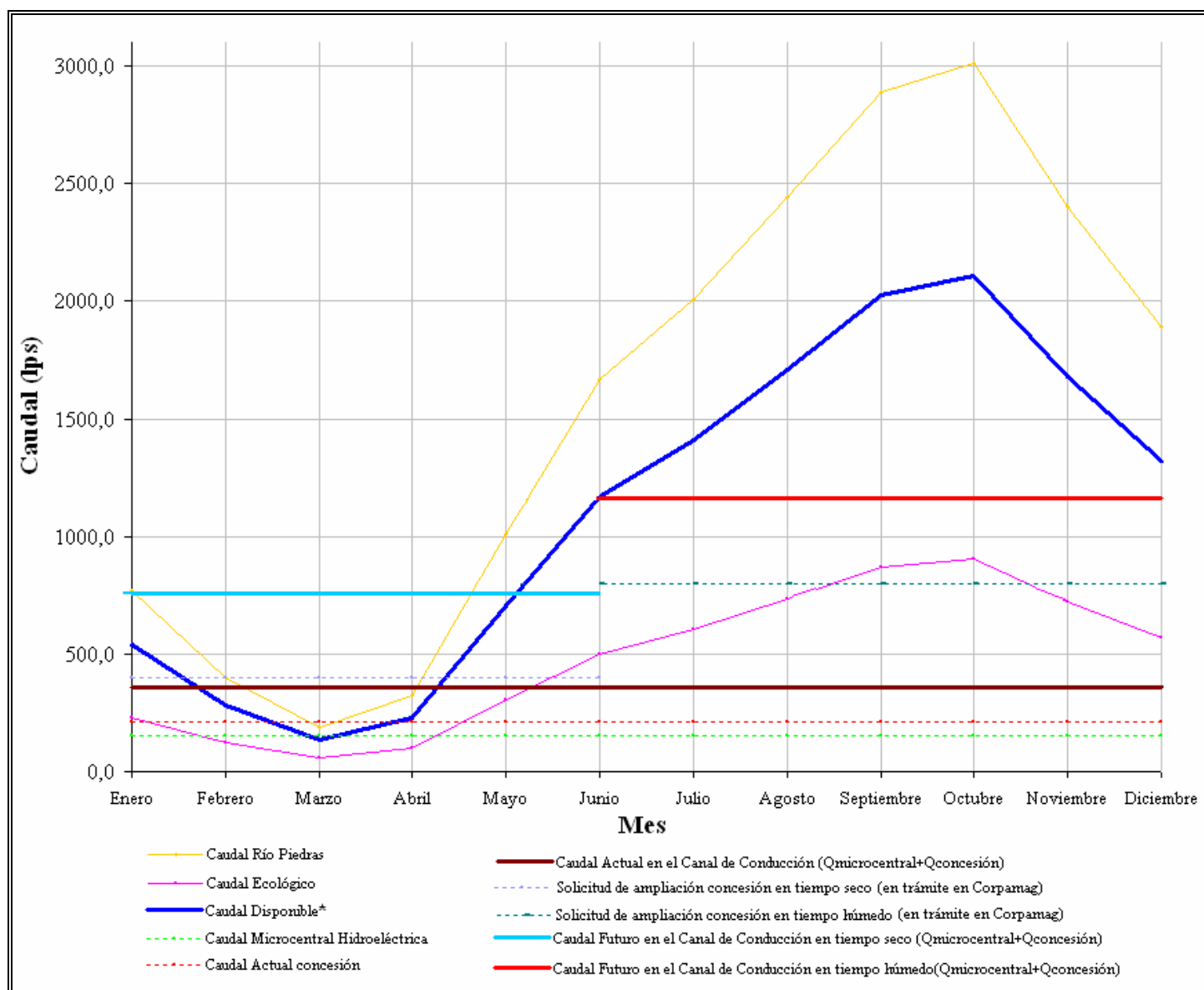
La reducción del caudal circulante podría empeorar los actuales escenarios de contaminación y de degradación de nuestros ríos. Por lo tanto es necesario aplicar metodologías de cálculo del caudal ecológico que tengan en cuenta dichas comunidades biológicas y realizar una vigilancia de dichos caudales con el fin de comprobar el cumplimiento de los objetivos ambientales establecidos. No obstante, hay que tener en cuenta que la aplicación de este tipo de metodologías no es sencilla, por lo que el establecimiento del caudal ecológico se enfrenta a una problemática concreta que habrá de resolverse en un marco estratégico de trabajo más amplio. Para hacer una estimación aproximada del caudal disponible del Río Piedras se dispondrá del treinta por ciento del caudal del río para la conservación ecológica del mismo; lo anterior por razones de incertidumbre, beneficio de la duda y aplicando el principio de precaución sobre la sostenibilidad.

**Cuadro 29. Caudal disponible del Río Piedras a la altura de la captación del acueducto distrital**

Mes	Caudal (lps)		
	Río Piedras	Ecológico	Q * Disponible
Enero	768,9	230,7	538,2
Febrero	402,1	120,6	281,5
Marzo	190	57	133
Abril	325,1	97,5	227,6
Mayo	1010	303	707
Junio	1669,1	500,7	1168,4
Julio	2010	603	1407
Agosto	2442,9	732,9	1710
Septiembre	2891,5	867,4	2024
Octubre	3010	903	2107
Noviembre	2399,8	719,9	1679,9
Diciembre	1890	567	1323

**Q\*:** Caudal derivado por los habitantes de fincas ubicadas aguas arriba del punto de captación

Del Río Piedras actualmente se está derivando, concedido por Corpamag, 210 lps por parte del acueducto distrital y otros 150 lps para una microcentral hidroeléctrica que después de utilizar el recurso hídrico lo devuelve a la corriente principal a la altura de 500 m.s.n.m., aguas abajo del punto de captación del acueducto. Además actualmente reposa en Corpamag una solicitud de ampliación de la concesión actual a 400 lps adicionales en los meses secos y a 800 lps adicionales en meses húmedos. De aceptarse tal solicitud se estarían requiriendo en total 760 lps en los primeros seis meses del año y 1160 lps en los seis últimos. En la Figura 40 se encuentra la representación gráfica de los Caudales disponibles y captados del Río Piedras a la altura de la captación del acueducto distrital, tanto los actuales como los futuros si se llegase a cometer la irresponsabilidad de ceder el aumento en el caudal de captación; por lo que se recomienda para todos los efectos revisar y analizar el tema con visión de sostenibilidad y prevención del mismo y expresar mecanismos y la aplicación de tecnologías que garanticen la sostenibilidad del recurso hídrico de la cuenca del Río Piedras. Para apreciar mejor la problemática que implicaría conceder las ampliaciones de las solicitudes la Figura 41 muestra el caudal que quedaría circulando por el río a partir de la captación.



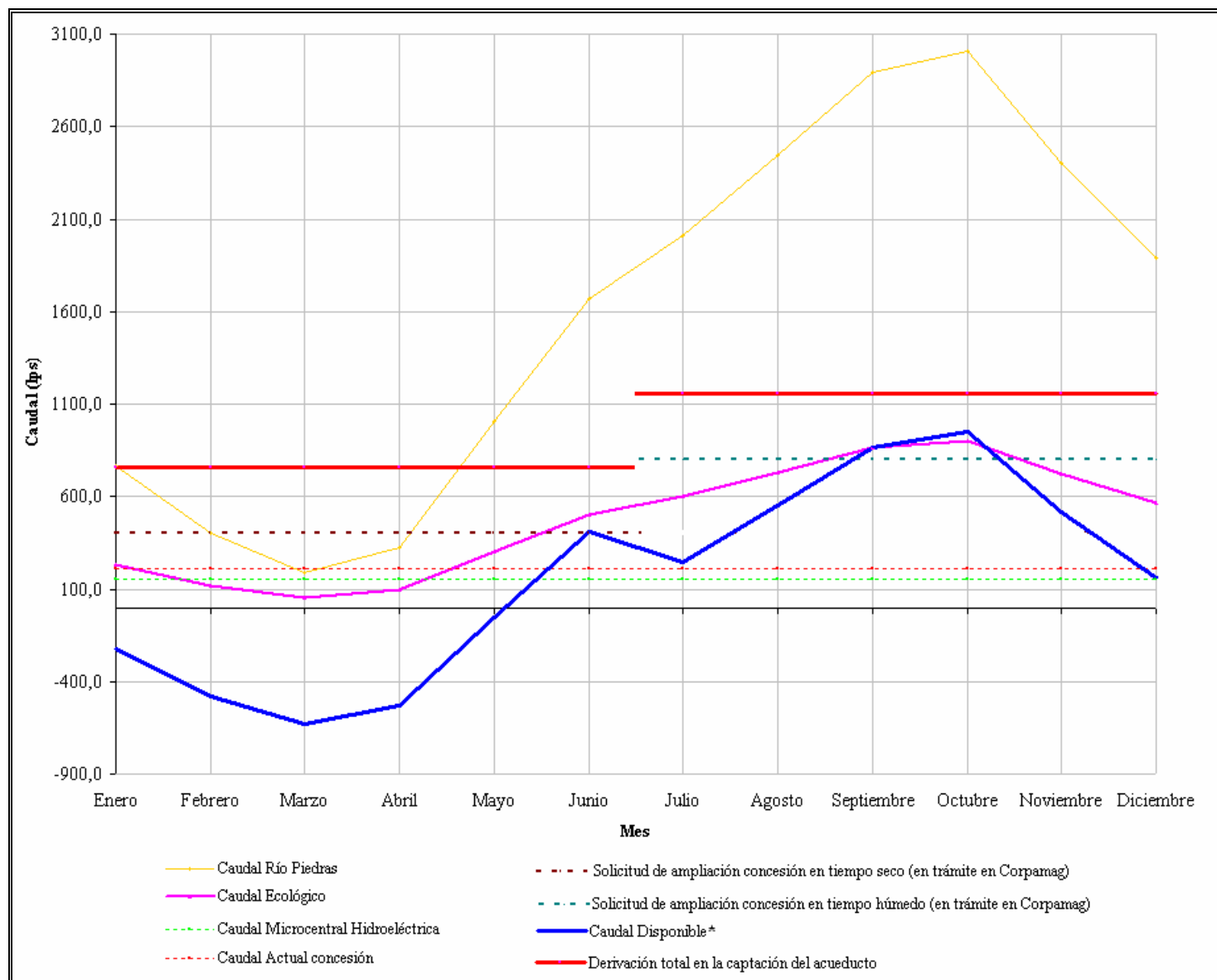
**Figura 40. Representación gráfica de los Caudales disponibles y captados del Río Piedras a la altura de la captación del acueducto distrital.**  
**Caudal disponible\*:** Caudal disponible considerando un 30% de caudal ecológico, pero aún falta considerar las derivaciones aguas arriba del punto de captación.



**Cuadro 30. Caudal disponible del Río Piedras a la altura de la captación del acueducto distrital de ser concedidos los aumentos de caudales en la captación**

Mes	Caudal Río Piedras	Q*	Caudal Ecológico	Caudal Microcentral Hidroeléctrica	Caudal Actual concesión	Solicitud de ampliación concesión en tiempo seco (en trámite en Corpamag)	Solicitud de ampliación concesión en tiempo húmedo (en trámite en Corpamag)	Derivación total en la captación del acueducto	Caudal Disponible
Enero	768,9		230,7	150	210	400		760	-221,8
Febrero	402,1		120,6	150	210	400		760	-478,5
Marzo	190,0		57,0	150	210	400		760	-627,0
Abril	325,1		97,5	150	210	400		760	-532,4
Mayo	1010,0		303,0	150	210	400		760	-53,0
Junio	1669,1		500,7	150	210	400		760	408,4
Julio	2010,0		603,0	150	210		800	1160	247,0
Agosto	2442,9		732,9	150	210		800	1160	550,0
Septiembre	2891,5		867,4	150	210		800	1160	864,0
Octubre	3010,0		903,0	150	210		800	1160	947,0
Noviembre	2399,8		719,9	150	210		800	1160	519,9
Diciembre	1890,0		567,0	150	210		800	1160	163,0

Q\*: Caudal derivado por los habitantes de fincas ubicadas aguas arriba del punto de captación



**Figura 41. Representación gráfica de los Caudales disponibles y captados del Río Piedras a la altura de la captación del acueducto distrital si se llegase a conceder el aumento del caudal de concesión.**

**Caudal disponible\*:** Caudal disponible considerando un 30% de caudal ecológico, pero aún falta considerar las derivaciones aguas arriba del punto de captación.

## **CONCLUSIONES**

Actualmente la cuenca del Río Piedras está siendo sobre explotada hídricamente los primeros meses del año ya que normalmente las concesiones para extracción del recurso hídrico de los cuerpos de agua no son más que un número fijo de litros por segundo para cualquier época del año. Y si bien es cierto que a partir del mes de mayo el río cuenta con caudales superiores a los de la concesión actual, es necesario llevar a cabo una serie de proyectos físicos, biológicos, geomorfológicos, sociales, económicos, ambientales, etc, de modo que al fusionarlos se pueda establecer un verdadero balance hídrico de la Cuenca del Río Piedras y por lo tanto establecer la verdadera disponibilidad del recurso hídrico antes de conceder ampliaciones a la concesión actual.

## RECOMENDACIONES

Una vez desarrollado el presente documento, y en consideración con las limitaciones encontradas, fundamentadas la gran mayoría en la no disponibilidad de información e investigaciones sobre el tema y la falta de rastreo climatológico, entre otros temas como:

- Aspectos Antropológicos
- Aspectos socioeconómicos
- Aspectos bióticos
- Aspectos de calidad de agua
- Aspectos relacionados con bioindicadores
- Aspectos referidos a planes de ordenamientos de la cuenca hidrográfica del Río Piedras
- Aspectos referidos a planes de reglamentación del recurso agua de la cuenca del Río Piedras
- Aspectos referidos a lo no existencia de metodologías investigativas y aplicadas para definir el caudal ecológico de la cuenca del Río Piedras en particular

Se ha realizado un listado de recomendaciones, las cuales deben ser tenidas en cuenta, de forma obligada para definir el balance hídrico de la cuenca del Río Piedras previo a la justificación de acciones que puedan seguir degradando a la hoy y deteriorando al recurso hídrico y su disponibilidad como en el caso de aumento de concesiones o construcción de mayores captaciones.

Dado lo anterior se recomienda:

1. La implementación de una red de estaciones hidrometeorológicas por parte del IDEAM que estén lo suficientemente equipadas y bien distribuidas como para obtener los valores de los parámetros necesarios para hacer una caracterización, es decir, conocer una cantidad de datos confiables que brinden la posibilidad de ser comparados con los valores simulados, de manera que los modelos se puedan calibrar para adecuarlos a las condiciones del medio.

2. Si se desea mejorar el abastecimiento de agua del distrito de Santa Marta, antes de pensar en aumentar los caudales de extracción se debería analizar la posibilidad de cambiar el sistema de captación de modo que el impacto ambiental, sobre todo en los primeros meses del año no sea contraproducente para la cuenca del Río Piedras. Por ejemplo contemplar la posibilidad de represar el agua sobrante en la época de invierno para suplir el déficit en verano.
3. Un aspecto que debería tomar en cuenta la entidad encargada de prestar el servicio de acueducto en el distrito de Santa Marta es la realización de más visitas al campo para obtener mayor información acerca del comportamiento hidrológico de la subcuenca y así mismo conocer historial de la misma, haciéndole un seguimiento de cerca al Río Piedras, preservándolo y estimando posibles disminuciones necesarias para respetar en todo momento el caudal ecológico que permitirá la estabilidad de la cuenca aguas abajo de la subcuenca. Lo ideal serían visitas cada quince días de modo que se pueda ajustar de forma acertada un modelo hidrológico.
4. Realizar estudios biológicos, antropológicos y socioeconómicos que permitan establecer el balance hídrico de la cuenca a la vez que se realice un estudio de reglamentación fundamentada en la definición técnica y científica del caudal ecológico del Río Piedras y su fluctuación; de modo que se genere la información hidrológica y la verdadera disponibilidad temporal y espacial del recurso hídrico de la Cuenca.
5. Una vez determinada la verdadera disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del Río Piedras, haya déficit o no, se recomienda definir las medidas necesarias que garanticen la sostenibilidad del agua y la preservación de la cuenca.
6. Como custodios de los recursos hídricos de la Nación, las entidades Privadas y Gubernamentales deberían asegurar que el desarrollo, asignación, gestión y uso de estos recursos sea llevado adelante utilizando el criterio del interés público, sostenibilidad, equidad y eficiencia de uso de una manera que reflejen sus obligaciones con el interés público y el

valor del agua para la sociedad al mismo tiempo que asegura que las necesidades domésticas básicas, los requerimientos del ambiente y las obligaciones impuestas en los convenios internacionales signadas por Colombia sean atendidas.

7. En pro de preservar los recursos naturales de la nación, tendiendo en cuenta el actual uso indiscriminado e irracional que contaminan y deterioran las fuentes hídricas superficiales y subterráneas, se recomienda utilizar un grupo de herramientas que permitan crear una política nacional de recursos hídricos, tales como: concientización a todos los niveles, actualización legal-administrativa, monitoreo sistemático, sistema integrado de información hídrica, optimización de sistemas hidráulico, instrumentos de gestión ambiental, formación de capacidades, red de extensión y comunicación hídrica.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**GERMÁN MONSALVE SÁENZ, 1995. Hidrología en la ingeniería. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.**

**FRANCISCO JAVIER APARICIO MIJARES, 1997. Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa, S. A. de C. V. Grupo Noriega Editores.**

**RAY K. LINSLEY, JR, MAX A. KOHLER, JOSEPH L.H. PAULUS, 1977. Hidrología para ingenieros. Editorial McGraw-Hill Latinoamericana, S.A.**

**CHOW, 1996. Hidrológica aplicada. Editorial McGraw-Hill Latinoamericana, S.A.**

**IGAC. Planchas 12-III-A, 12-III-B, 12-III-C, 12-I-C Y 12-III-D, a escala 1:25.000 con curvas de nivel a cada cincuenta (50) metros.**

**IDEAM. Valor total mensual de precipitación, estaciones San Lorenzo, Parque Tayrona y Guachaca, Valor máximo mensual de precipitación, estaciones San Lorenzo y Parque Tayrona, Valor medio mensual de temperatura de las estaciones Parque Tayrona y San Lorenzo, Valores medios y máximos de caudales de la estación la Revuelta, IDEAM.**

**UMATA. Generalidades de la Cuenca del Río Piedras.**

**SOFTWARES. MICROSOFT OFFICE, AUTOCAD, DXF2XYZ 2.0, SURFER 7, HIDROBAS, HIDROSIG JAVA.**

# **ANEXOS**



### Anexo 1. Valor total mensual de precipitación (mm), estación San Lorenzo

Año	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
1982	91.5	29.0	15.5	68.4	311.2	208.0	112.0	<b>220.1</b>	<b>460.7</b>	<b>589.8</b>	181.5	35.7
1983	0.2	16.4	8.2	145.0	163.9	336.0	372.8	316.5	360.3	386.5	77.9	35.8
1984	13.8	13.1	3.3	101.3	159.4	265.0	246.5	353.0	474.6	446.7	312.3	22.3
1985	9.6	11.7	9.6	77.1	119.1	167.2	402.6	356.4	577.0	550.5	172.0	154.1
1986	13.6	27.0	26.0	235.4	266.9	311.7	142.5	340.4	315.7	405.0	99.1	29.6
1987	55.1	9.5	35.1	428.5	304.9	289.9	472.9	440.6	413.1	318.2	142.8	79.1
1988	2.0	4.1	8.0	147.3	310.2	457.7	573.1	644.9	531.0	492.4	222.0	46.9
1989	3.3	36.7	20.2	13.3	236.2	155.6	400.1	384.6	494.2	285.7	206.7	83.0
1990	4.0	3.0	6.4	268.0	<b>350.0</b>	<b>193.5</b>	<b>234.7</b>	<b>360.2</b>	<b>116.5</b>	<b>76.0</b>	371.9	120.3
1991	<b>0.0</b>	168.6	71.4	125.8	201.0	253.3	134.3	324.9	363.1	358.8	382.8	15.3
1992	0.2	0.0	0.3	205.7	577.4	355.9	404.0	<b>350.2</b>	370.3	242.1	58.7	48.0
1993	43.7	20.1	60.4	178.2	486.3	187.9	197.9	299.8	397.4	205.3	130.2	14.1
1994	0.0	0.4	7.0	66.7	130.0	83.0	86.9	211.9	231.2	263.6	265.8	0.0
1995	10.0	0.0	115.7	147.9	208.7	324.5	487.7	479.1	405.4	249.6	87.9	24.6
1996	12.2	28.3	93.8	125.8	400.1	284.5	444.8	223.6	447.9	385.9	427.0	78.2
1997	8.7	14.8	0.0	100.9	219.8	577.7	171.5	215.9	339.1	350.2	124.6	3.1
1998	0.0	35.1	17.0	181.7	366.4	428.2	313.8	394.6	608.7	486.7	273.4	253.9
1999	14.8	59.4	26.9	249.4	187.4	496.9	387.6	434.1	336.2	474.1	345.3	798.9
2000	57.4	79.9	2.7	62.9	274.9	348.3	501.7	507.7	428.8	292.2	208.0	102.9
2001	6.4	<b>0.0</b>	102.9	54.0	498.2	227.2	251.6	434.3	340.4	340.8	310.1	182.0
2002	10.7	0.0	51.2	231.5	177.3	317.9	247.8	461.1	502.6	472.9	173.0	28.8
2003	0.0	1.6	21.8	136.0	243.8	315.3	350.4	416.7	500.4	363.2	132.3	<b>96.3</b>
2004	6.6	0.0	10.2	239.9	308.7	215.8	358.8	459.3	603.5	<b>365.4</b>	<b>181.1</b>	<b>11.8</b>

\* Los datos en negrilla eran faltantes y fueron correlacionados con los de la estación Minca

**Anexo 2. Valor máximo mensual de precipitación (mm), estación San Lorenzo**

Año	Precipitación (mm)
1984	100.3
1985	80.0
1986	112.0
1987	81.0
1988	97.0
1989	80.0
1990	51.1
1991	88.0
1992	101.5
1993	78.0
1994	58.0
1995	81.0
1996	165.9
1997	135.0
1998	100.0
1999	142.5
2000	168.0
2001	110.0
2002	96.8
2003	110.5
2004	92.3

### Anexo 3. Valor total mensual de precipitación (mm), estación Guachaca

Año	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
1982	52.2	9.0	0.0	18.8	55.9	50.0	5.4	0.0	0.0	<b>128.9</b>	89.7	115.5
1983	<b>0.9</b>	21.0	91.4	263.1	<b>212.8</b>	<b>16.2</b>	<b>17.3</b>	<b>50.6</b>	257.5	<b>254.8</b>	159.0	11.7
1984	17.6	20.6	1.6	30.7	34.9	99.7	276.2	120.5	279.7	535.0	508.0	90.7
1985	<b>1.3</b>	4.8	12.2	60.4	<b>20.5</b>	<b>2.1</b>	<b>8.5</b>	<b>21.7</b>	<b>16.3</b>	<b>44.8</b>	<b>70.8</b>	<b>103.6</b>
1986	136.5	24.9	38.5	110.1	170.8	36.2	0.7	66.2	273.2	906.1	204.2	55.0
1987	60.6	70.7	98.4	443.3	503.1	167.9	82.3	271.5	152.6	326.8	166.1	271.5
1988	2.8	20.5	20.8	16.7	89.7	229.9	277.3	459.2	306.7	362.0	560.6	50.4
1989	13.9	12.4	61.4	35.1	92.3	20.6	159.2	140.4	303.1	477.8	249.6	91.3
1990	10.5	12.1	16.1	326.2	338.7	41.0	35.3	183.6	377.3	313.6	142.6	234.5
1991	0.0	199.3	183.8	3.5	36.8	14.1	0.0	42.0	380.0	152.7	352.0	83.7
1992	4.5	50.3	8.0	64.4	474.5	115.5	124.5	79.0	134.2	532.7	159.1	13.0
1993	0.0	62.3	0.0	19.0	88.0	41.0	44.0	125.0	102.2	212.4	231.7	114.6
1994	0.0	0.7	39.4	56.2	152.8	20.0	0.0	170.0	286.0	307.3	766.3	64.1
1995	37.0	2.0	64.0	102.0	98.0	172.0	236.0	267.0	276.6	172.0	138.0	282.0
1996	109.0	36.0	271.0	2.0	198.2	177.9	306.3	172.0	227.0	442.0	208.0	51.0
1997	25.0	5.0	4.0	31.0	13.0	164.0	4.0	34.0	115.0	163.0	341.0	0.0
1998	0.0	235.0	18.0	254.0	429.0	76.0	174.0	147.0	275.0	307.0	574.0	170.0
1999	10.0	45.0	79.0	269.0	75.0	207.0	82.0	357.0	381.0	126.0	233.0	547.0
2000	71.0	96.0	16.0	35.0	83.0	259.0	75.0	220.0	309.0	384.0	325.0	109.0
2001	30.0	0.0	24.0	26.0	109.0	17.0	13.0	54.0	144.0	497.0	453.0	297.0
2002	27.0	0.0	46.0	109.0	40.0	31.0	8.0	92.0	170.0	375.0	96.0	0.0
2003	0.0	0.0	45.0	232.0	12.0	203.0	81.0	262.0	327.0	364.0	594.0	238.0

\* Los datos en negrilla eran faltantes y fueron correlacionados con los de la estación Parque Tayrona

#### Anexo 4. Valor total mensual de precipitación (mm), estación Parque Tayrona

Año	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
1982	18.8	15.5	0.2	20.5	310.9	43.0	3.8	28.6	277.9	362.5	62.9	71.9
1983	0.6	11.1	26.7	501.3	136.7	10.4	11.1	32.5	89.8	163.7	44.5	4.1
1984	73.9	10.4	2.7	18.6	30.9	72.5	226.6	29.6	459.3	391.1	427.1	60.3
1985	8.0	6.9	16.5	99.4	124.9	12.6	51.6	132.3	99.7	273.3	432.0	632.1
1986	46.8	27.1	6.4	103.7	187.4	87.0	0.0	68.7	183.5	538.5	129.6	11.5
1987	34.0	30.0	21.1	228.0	484.3	91.4	92.1	209.4	229.8	296.8	135.8	243.6
1988	1.1	32.4	23.7	12.5	20.6	147.5	241.3	469.8	172.6	268.9	422.7	49.0
1989	6.6	13.7	69.3	23.3	128.7	7.8	85.9	67.0	177.7	331.7	204.2	105.6
1990	7.8	8.0	2.8	98.1	152.0	11.8	5.2	77.3	240.7	407.4	246.6	48.5
1991	0.1	99.2	156.2	3.6	30.5	19.0	2.1	26.4	171.0	219.4	219.0	22.5
1992	2.6	10.6	1.1	70.9	226.7	34.8	60.0	180.3	146.9	330.0	353.6	21.5
1993	6.2	28.2	4.6	54.4	286.0	14.1	4.5	17.5	58.7	181.7	291.0	35.8
1994	0.0	4.4	8.5	32.5	57.1	0.8	4.3	15.5	176.8	136.3	425.4	5.7
1995	1.2	33.1	32.0	85.1	44.7	48.8	8.5	98.9	132.0	49.2	37.4	82.5
1996	23.8	15.3	53.6	15.9	96.4	90.1	43.3	63.4	121.5	264.3	261.4	51.9
1997	6.1	1.8	0.0	11.3	0.0	<b>7.0</b>	<b>0.2</b>	<b>1.5</b>	<b>4.9</b>	<b>7.0</b>	<b>14.6</b>	0.0
1998	0.0	155.1	2.0	107.0	111.2	71.8	124.6	114.3	90.1	63.6	142.5	212.3
1999	5.3	32.0	0.0	86.2	<b>51.9</b>	154.3	36.2	135.9	252.9	149.6	142.7	534.9
2000	76.5	51.7	13.6	20.4	37.7	83.1	22.5	0.0	149.2	93.2	69.3	<b>37.0</b>
2001	<b>37.5</b>	<b>0.0</b>	<b>30.0</b>	131.0	101.3	29.3	2.9	20.6	96.2	506.2	73.0	599.3
2002	193.4	3.4	<b>30.59</b>	<b>72.48</b>	78.6	93.8	0	25	68.5	16.8	16.2	<b>0.0</b>
2003	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	0	192	<b>5.9</b>	<b>99.2</b>	<b>39.6</b>	<b>128.0</b>	<b>159.8</b>	<b>177.8</b>	<b>290.2</b>	<b>116.3</b>

\* Los datos en negrilla eran faltantes y fueron correlacionados con los de la estación Guachaca

**Anexo 5. Valor total mensual de precipitación (mm), estación Parque Tayrona  
Correlacionada**

Año	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
1982	23.1	19.0	0.2	25.2	381.9	52.8	4.7	35.1	341.3	445.2	77.3	88.3
1983	0.7	13.6	32.8	615.7	167.9	12.8	13.6	39.9	110.3	201.1	54.7	5.0
1984	90.8	12.8	3.3	22.8	38.0	89.0	278.3	36.4	564.1	480.4	524.6	74.1
1985	9.8	8.5	20.3	122.1	153.4	15.5	63.4	162.5	122.5	335.7	530.6	776.4
1986	57.5	33.3	7.9	127.4	230.2	106.9	0.0	84.4	225.4	661.4	159.2	14.1
1987	41.8	36.8	25.9	280.0	594.8	112.3	113.1	257.2	282.2	364.5	166.8	299.2
1988	1.4	39.8	29.1	15.4	25.3	181.2	296.4	577.0	212.0	330.3	519.2	60.2
1989	8.1	16.8	85.1	28.6	158.1	9.6	105.5	82.3	218.3	407.4	250.8	129.7
1990	9.6	9.8	3.4	120.5	186.7	14.5	6.4	94.9	295.6	500.4	302.9	59.6
1991	0.1	121.8	191.8	4.4	37.5	23.3	2.6	32.4	210.0	269.5	269.0	27.6
1992	3.2	13.0	1.4	87.1	278.4	42.7	73.7	221.4	180.4	405.3	434.3	26.4
1993	7.6	34.6	5.6	66.8	351.3	17.3	5.5	21.5	72.1	223.2	357.4	44.0
1994	0.0	5.4	10.4	39.9	70.1	1.0	5.3	19.0	217.1	167.4	522.5	7.0
1995	1.5	40.7	39.3	104.5	54.9	59.9	10.4	121.5	162.1	60.4	45.9	101.3
1996	29.2	18.8	65.8	19.5	118.4	110.7	53.2	77.9	149.2	324.6	321.1	63.7
1997	7.5	2.2	0.0	13.9	0.0	8.6	0.2	1.8	6.0	8.6	17.9	0.0
1998	0.0	190.5	2.5	131.4	136.6	88.2	153.0	140.4	110.7	78.1	175.0	260.7
1999	6.5	39.3	0.0	105.9	63.8	189.5	44.5	166.9	310.6	183.7	175.3	657.0
2000	94.0	63.5	16.7	25.1	46.3	102.1	27.6	0.0	183.2	114.5	85.1	45.5
2001	46.1	0.0	36.8	160.9	124.4	36.0	3.6	25.3	118.2	621.7	89.7	736.1
2002	237.5	4.2	37.6	89.0	96.5	115.2	0.0	30.7	84.1	20.6	19.9	0.0
2003	0.0	0.0	0.0	235.8	7.2	121.8	48.6	157.2	196.2	218.4	356.4	142.8

**Anexo 6. Valor máximo mensual anual de  
precipitación, estación Parque Tayrona  
y su correlación**

Año	Precipitación (mm)	Precipitación Correlacionada (mm)
1984	173.8	213.5
1985	332.8	408.7
1986	132.6	162.9
1987	110.6	135.8
1988	126.0	154.8
1989	107.0	131.4
1990	90.8	111.5
1991	112.3	137.9
1992	136.0	167.0
1993	142.0	174.4
1994	100.9	123.9
1995	48.5	59.6
1996	52.2	64.1
1997	78.6	0.0
1998	92.6	113.7
1999	108.0	132.6
2000	79.0	97.0
2001	133.0	163.4
2002	45.0	55.3
2003	119.3	146.5

### Anexo 7. Valores de $K_T$ según la función de distribución de probabilidad. Distribución Normal

$K_T$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5754
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7258	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7518	0.7549
0.7	0.7580	0.7612	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7996	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
2.0	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.9	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
3.0	0.9987	0.9987	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989	0.9989	0.9990	0.9990
3.1	0.9990	0.9991	0.9991	0.9991	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992	0.9993	0.9993
3.2	0.9993	0.9993	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9995	0.9995	0.9995
3.3	0.9995	0.9995	0.9995	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9997
3.4	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9998
3.5	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998
3.6	0.9998	0.9998	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
3.7	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
3.8	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
3.9	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

**Anexo 8. Valores de  $\chi^2$  de la distribución ji-cuadrado con n grados de libertad.  
Distribución Pearson y Log-Pearson tipo III.**

n	$\chi^2_{0.995}$	$\chi^2_{0.99}$	$\chi^2_{0.975}$	$\chi^2_{0.95}$	$\chi^2_{0.90}$	$\chi^2_{0.75}$	$\chi^2_{0.50}$	$\chi^2_{0.25}$	$\chi^2_{0.10}$	$\chi^2_{0.05}$	$\chi^2_{0.025}$	$\chi^2_{0.01}$	$\chi^2_{0.005}$
1	7.88	6.63	5.02	3.84	2.71	1.32	0.455	0.102	0.0158	0.0039	0.001	0.0002	0.00
2	10.60	9.21	7.38	5.99	4.61	2.77	1.39	0.575	0.211	0.103	0.0506	0.0201	0.010
3	12.80	11.30	9.35	7.81	6.25	4.11	2.37	1.21	0.584	0.352	0.216	0.115	0.072
4	14.90	13.30	11.10	9.49	7.78	5.39	3.36	1.92	1.06	0.711	0.484	0.297	0.207
5	16.70	15.10	12.80	11.10	9.24	6.63	4.35	2.67	1.61	1.15	0.83	0.55	0.41
6	18.50	16.80	14.40	12.60	10.60	7.84	5.35	3.45	2.20	1.64	1.24	0.87	0.68
7	20.30	18.50	16.00	14.10	12.00	9.04	6.35	4.25	2.83	2.17	1.69	1.24	0.99
8	22.00	20.10	17.50	15.50	13.40	10.20	7.34	5.07	3.49	2.73	2.18	1.65	1.34
9	23.60	21.70	19.00	16.90	14.70	11.40	8.34	5.90	4.17	3.33	2.70	2.09	1.73
10	25.20	23.20	20.50	18.30	16.00	12.50	9.34	6.74	4.87	3.94	3.25	2.56	2.16
11	26.80	24.70	21.90	19.70	17.30	13.70	10.30	7.58	5.58	4.57	3.82	3.05	2.60
12	28.30	26.20	23.30	21.00	18.50	14.80	11.30	8.44	6.30	5.23	4.40	3.57	3.07
13	29.80	27.70	24.70	22.40	19.80	16.00	12.30	9.30	7.04	5.89	5.01	4.11	3.57
14	31.30	29.10	26.10	23.70	21.10	17.10	13.30	10.20	7.79	6.57	5.63	4.66	4.07
15	32.80	30.60	27.50	25.00	22.30	18.20	14.30	11.00	8.55	7.26	6.26	5.23	4.60
16	34.30	32.00	28.80	26.30	23.50	19.40	15.30	11.90	9.31	7.96	6.91	5.81	5.14
17	35.70	33.40	30.20	27.60	24.80	20.50	16.30	12.80	10.10	8.67	7.56	6.41	5.70
18	37.20	34.80	31.50	28.90	26.00	21.60	17.30	13.70	10.90	9.39	8.23	7.01	6.26
19	38.60	36.20	32.90	30.10	27.20	22.70	18.30	14.60	11.70	10.10	8.91	7.63	6.84
20	40.00	37.60	34.20	31.40	28.40	23.80	19.30	15.50	12.40	10.90	9.59	8.26	7.43
21	41.40	38.90	35.50	32.70	29.60	24.90	20.30	16.30	13.20	116.00	10.30	8.90	8.03
22	42.80	40.30	36.80	33.90	30.80	26.00	21.30	17.20	14.00	12.30	11.00	9.54	8.64
23	44.20	41.60	38.10	35.20	32.00	27.10	22.30	18.10	14.80	13.10	11.70	10.20	9.26
24	45.60	43.00	39.40	36.40	33.20	28.20	23.30	19.00	15.70	13.80	12.40	10.90	9.89
25	46.90	44.30	40.60	37.70	34.40	29.30	24.30	19.90	16.50	14.60	13.10	11.50	10.50
26	48.30	45.60	41.90	38.90	35.60	30.40	25.30	20.80	17.30	15.40	13.80	12.20	11.20
27	49.60	47.00	43.20	40.10	36.70	31.50	26.30	21.70	18.10	16.20	14.60	12.90	11.80
28	51.00	48.30	44.50	41.30	37.90	32.60	27.30	22.70	18.90	16.90	15.30	13.60	12.50
29	52.30	49.60	45.70	42.60	39.10	33.70	28.30	23.60	19.80	17.70	16.00	14.30	13.10
30	53.70	50.90	47.00	43.80	40.30	34.80	29.30	24.50	20.60	18.50	16.80	15.00	13.80
40	66.80	63.70	59.30	55.80	51.8	45.60	39.30	33.70	29.10	26.50	24.40	22.20	20.70
50	79.50	76.20	71.40	67.50	63.20	56.30	49.30	42.90	37.70	34.80	32.40	29.70	28.00
60	92.00	88.40	83.30	79.10	74.40	67.00	59.30	52.30	46.50	43.20	40.50	37.50	35.50
70	104.20	100.40	95.00	90.50	85.50	77.60	69.30	617.00	55.30	51.70	48.80	45.40	43.30
80	116.30	112.3	106.60	1019.00	96.60	88.10	79.30	71.10	64.30	60.40	57.20	53.50	51.20
90	128.30	124.10	118.10	113.10	107.60	98.60	89.30	80.60	73.30	69.10	65.60	61.80	59.20
100	140.20	135.80	129.60	124.30	118.50	109.10	99.30	90.10	82.40	77.90	74.20	70.10	67.30



### Anexo 9. Factores de frecuencia $K_T$ . Distribución Gumbel

Tamaño de la muestra	Período de Retorno (Años)								
	5	10	15	20	25	50	75	100	1000
15	0.967	1.703	2.117	2.41	2.632	3.321	3.721	4.005	6.265
20	0.919	1.625	2.023	2.302	2.517	3.179	3.563	3.836	6.006
25	0.888	1.575	1.963	2.235	2.444	3.088	3.463	3.729	5.842
30	0.866	1.541	1.922	2.188	2.393	3.026	3.393	3.653	5.727
35	0.851	1.516	1.891	2.152	2.354	2.979	3.341	3.598	
40	0.838	1.495	1.866	2.126	2.326	2.943	3.301	3.554	5.576
45	0.829	1.478	1.847	2.104	2.303	2.913	3.268	3.52	
50	0.82	1.466	1.831	2.086	2.283	2.889	3.241	3.491	5.478
55	0.813	1.455	1.818	2.071	2.267	2.869	3.219	3.467	
60	0.807	1.446	1.806	2.059	2.253	2.852	3.2	3.446	
65	0.801	1.437	1.796	2.048	2.241	2.837	3.183	3.429	
70	0.797	1.43	1.788	2.038	2.23	2.824	3.169	3.413	5.359
75	0.792	1.423	1.78	2.029	2.22	2.812	3.155	3.4	
80	0.788	1.417	1.773	2.02	2.212	2.802	3.145	3.387	
85	0.785	1.413	1.767	2.013	2.205	2.793	3.135	3.376	
90	0.782	1.409	1.762	2.007	2.198	2.785	3.125	3.367	
95	0.780	1.405	1.757	2.002	2.193	2.777	3.116	3.357	
100	0.779	1.401	1.752	1.998	2.187	2.77	3.109	3.349	5.261
$\infty$	0.719	1.305	1.635	1.866	2.044	2.592	2.911	3.137	4.936

**Anexo 10. Precipitaciones calculadas con las diferentes distribuciones de probabilidad para cada período de retorno en la estación Parque Tayrona Correlacionada**

Periodo de retorno		5	10	25	50	100
Distribución Normal	$K_T$	0.813	1.223	1.795	2.059	2.599
	Precipitación (mm)	173.0	189.6	212.8	223.6	245.5
Distribución Pearson tipo III	$K_T$	0.818	1.315	1.871	2.246	2.594
	Precipitación (mm)	173.2	193.3	215.9	231.1	245.2
Distribución Log-Pearson tipo III	$K_T$	0.854	1.149	1.411	1.554	1.667
	Precipitación (mm)	175.5	192.6	209.2	218.9	226.8
Distribución Gumbel	$K_T$	0.888	1.575	2.444	3.088	3.729
	Precipitación (mm)	176.0	203.9	239.2	265.3	291.3

**Anexo 11. Precipitaciones calculadas con las diferentes distribuciones de probabilidad para cada período de retorno en la estación San Lorenzo**

Periodo de retorno		5	10	25	50	100
Distribución Normal	$K_T$	0.770	1.120	1.888	2.225	2.900
	Precipitación (mm)	124.9	135.6	159.1	169.4	190.0
Distribución Pearson tipo III	$K_T$	0.780	1.336	1.993	2.453	2.891
	Precipitación (mm)	125.2	142.2	162.3	176.4	189.8
Distribución Gumbel	$K_T$	0.913	1.615	2.502	3.161	3.815
	Precipitación (mm)	129.3	150.8	177.9	198.0	218.0

### Anexo 12. Resumen de la prueba de bondad de ajuste $\chi^2$ para la estación Parque Tayrona Correlacionada

Función de Distribución	Intervalo (I)	F(S <sub>i</sub> )	F(I <sub>i</sub> )	$\epsilon_i$	$(\theta_i - \epsilon_i)^2 / \epsilon_i$	D
Distribución Normal	1	0.093	0.016	1.93	0.00	
	2	0.309	0.093	5.39	0.03	
	3	0.627	0.309	7.94	0.53	
	4	0.874	0.627	6.18	0.01	
	5	0.975	0.874	2.54	0.93	
	6	0.997	0.975	0.55	0.37	
				24.53		1.87
Distribución Pearson III	1	0.049	0.004	1.13	0.66	
	2	0.314	0.049	6.61	0.39	
	3	0.666	0.314	8.82	0.16	
	4	0.900	0.666	5.84	0.00	
	5	0.978	0.900	1.96	0.47	
	6	0.998	0.978	0.50	0.50	
				24.85		2.19
Distribución Log-Pearson III	1	0.003	0.000	0.065	57.603	
	2	0.117	0.003	2.857	2.857	
	3	0.436	0.117	7.989	0.495	
	4	0.732	0.436	7.399	0.914	
	5	0.895	0.732	4.057	0.219	
	6	0.963	0.895	1.716	0.047	
				24.08		62.14
Distribución Gumbel	1	0.084	0.002	2.048	0.001	
	2	0.363	0.084	6.979	0.561	
	3	0.661	0.363	7.436	0.884	
	4	0.844	0.661	4.580	0.440	
	5	0.933	0.844	2.222	0.672	
	6	0.972	0.933	0.975	0.001	
				24.24		2.56

Nivel de significancia  $\alpha=0.05$

$\chi^2= 7.81$  para funciones de dos parámetros

$\chi^2= 5.99$  para funciones de tres parámetros

**Anexo 13. Resumen de la prueba de bondad de ajuste  $\chi^2$  para la Estación San Lorenzo**

Función de Distribución	Intervalo (I)	F(S <sub>i</sub> )	F(I <sub>i</sub> )	$\epsilon_i$	$(\theta_i - \epsilon_i)^2 / \epsilon_i$	D
Distribución Normal	1	0.124	0.031	1.95	0.00	
	2	0.328	0.124	4.30	0.11	
	3	0.394	0.328	1.38	22.90	
	4	0.837	0.606	4.85	0.71	
	5	0.955	0.837	2.48	0.09	
	6	0.992	0.955	0.78	1.92	
				15.74		25.73
Distribución Pearson III	1	0.087	0.004	1.738	0.040	
	2	0.334	0.087	5.190	0.007	
	3	0.607	0.334	5.723	0.285	
	4	0.807	0.607	4.210	0.348	
	5	0.923	0.807	2.441	0.080	
	6	0.951	0.923	0.585	3.426	
				19.89		4.18
Distribución Gumbel	1	0.130	0.013	2.472	0.090	
	2	0.386	0.130	5.375	0.026	
	3	0.641	0.386	5.357	0.504	
	4	0.813	0.641	3.597	0.099	
	5	0.908	0.813	1.994	0.000	
	6	0.956	0.908	1.009	0.972	
				19.80		<b>1.69</b>

Nivel de significancia  $\alpha=0.05$

$\chi^2= 7.81$  para funciones de dos parámetros

$\chi^2= 5.99$  para funciones de tres parámetros

**Anexo 14. Resumen de la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov para la estación Parque Tayrona Correlacionada**

m	$x_m$	$F_o(x_m)$	Normal $ F_o(x_m) - F(x_m) $	Pearson tipo III $ F_o(x_m) - F(x_m) $	Log-Pearson tipo III $ F_o(x_m) - F(x_m) $	Gumbel $ F_o(x_m) - F(x_m) $
1	246.7	0.962	0.034	0.034	0.006	0.005
2	213.5	0.923	0.042	0.047	0.008	0.002
3	175.4	0.885	0.076	0.051	0.074	0.089
4	169.1	0.846	<b>0.083</b>	0.050	0.057	0.083
5	167.0	0.808	0.060	0.024	0.027	0.056
6	163.4	0.769	0.052	0.008	0.002	0.039
7	162.9	0.731	0.017	0.028	0.035	0.004
8	154.8	0.692	0.050	0.010	0.029	0.020
9	149.4	0.654	0.063	0.026	0.028	0.022
10	146.6	0.615	0.050	0.014	0.046	0.004
11	146.6	0.577	0.013	0.023	0.083	0.033
12	142.6	0.538	0.013	0.022	0.091	0.039
13	141.5	0.500	0.015	0.049	0.121	0.068
14	137.9	0.462	0.018	0.052	0.131	0.075
15	135.8	0.423	0.036	0.068	0.152	0.095
16	132.6	0.385	0.043	0.071	0.164	0.104
17	131.4	0.346	0.070	<b>0.096</b>	<b>0.192</b>	<b>0.130</b>
18	123.9	0.308	0.038	0.052	0.158	0.096
19	116.7	0.269	0.013	0.010	0.114	0.064
20	113.7	0.231	0.028	0.017	0.118	0.073
21	111.5	0.192	0.049	0.036	0.129	0.090
22	97.0	0.154	0.009	0.047	0.003	0.001
23	96.6	0.115	0.027	0.013	0.030	0.036
24	64.1	0.077	0.046	0.072	0.077	0.066

d= 0.266

### Anexo 15. Resumen de la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov para la Estación San Lorenzo

m	$x_m$	$F_o(x_m)$	Normal	Pearson tipo III	Gumbel
			$F_o(x_m) - F(x_m)$	$F_o(x_m) - F(x_m)$	$F_o(x_m) - F(x_m)$
1	168.0	0.955	0.031	0.009	0.011
2	165.9	0.909	0.073	0.058	0.031
3	142.5	0.864	0.047	0.015	0.005
4	135.0	0.818	0.046	0.012	0.015
5	112.0	0.773	<b>0.137</b>	<b>0.139</b>	0.108
6	110.5	0.727	0.110	0.111	0.077
7	110.0	0.682	0.071	0.071	0.036
8	101.5	0.636	0.135	0.119	0.081
9	100.3	0.591	0.105	0.087	0.050
10	100.0	0.545	0.063	0.045	0.008
11	97.0	0.500	0.057	0.040	0.002
12	96.8	0.455	0.014	0.003	0.045
13	92.3	0.409	0.026	0.013	0.035
14	88.0	0.364	0.033	0.027	0.025
15	81.0	0.318	0.066	0.075	0.019
16	81.0	0.273	0.020	0.030	0.027
17	80.0	0.227	0.015	0.005	0.060
18	80.0	0.182	0.060	0.051	0.105
19	78.0	0.136	0.086	0.074	<b>0.126</b>
20	58.0	0.091	0.013	0.054	0.023
21	51.1	0.045	0.005	0.032	0.013

$d = 0.285$

### Anexo 16. Número de curva de escorrentía para tierras agrícolas cultivadas

Uso de la Tierra	COBERTURA		GRUPO DE SUELOS			
	Tratamiento o Práctica	Condición Hidrológica	A	B	C	D
			Número de curva			
Rastrojo	Hileras rectas	---	77	86	91	94
Cultivos en hileras	Hileras rectas	Mala	71	81	88	91
		Buena	67	78	85	89
	Curvas de nivel	Mala	70	79	84	88
		Buena	65	75	82	86
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	66	74	80	82
		Buena	62	71	78	81
Cultivos en hileras estrechas	Hileras rectas	Mala	65	76	84	88
		Buena	63	75	83	87
	Curvas de nivel	Mala	63	74	82	85
		Buena	61	73	81	84
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	61	72	79	82
		Buena	59	70	78	81
Leguminosas en <sup>1</sup> hileras estrechas o forraje en rotación	Hileras rectas	Mala	66	77	85	89
		Buena	58	72	81	85
	Curvas de nivel	Mala	64	75	83	85
		Buena	55	69	78	83
	Curvas de nivel y terrazas	Mala	63	73	80	83
		Buena	51	67	76	80
Pastos de pastoreo	Curvas de nivel	Mala	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Buena	39	61	74	80
		Mala	47	67	81	88
		Regular	25	59	75	83
		Buena	6	35	70	79
Pastos de corte		Buena	30	58	71	78
Bosque		Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Patios		---	59	74	82	86
Caminos de tierra <sup>2</sup>		---	72	82	87	89
Pavimentos		---	74	84	90	92

1 Siembra tupida o al voleo

2 Incluyendo derecho de vía

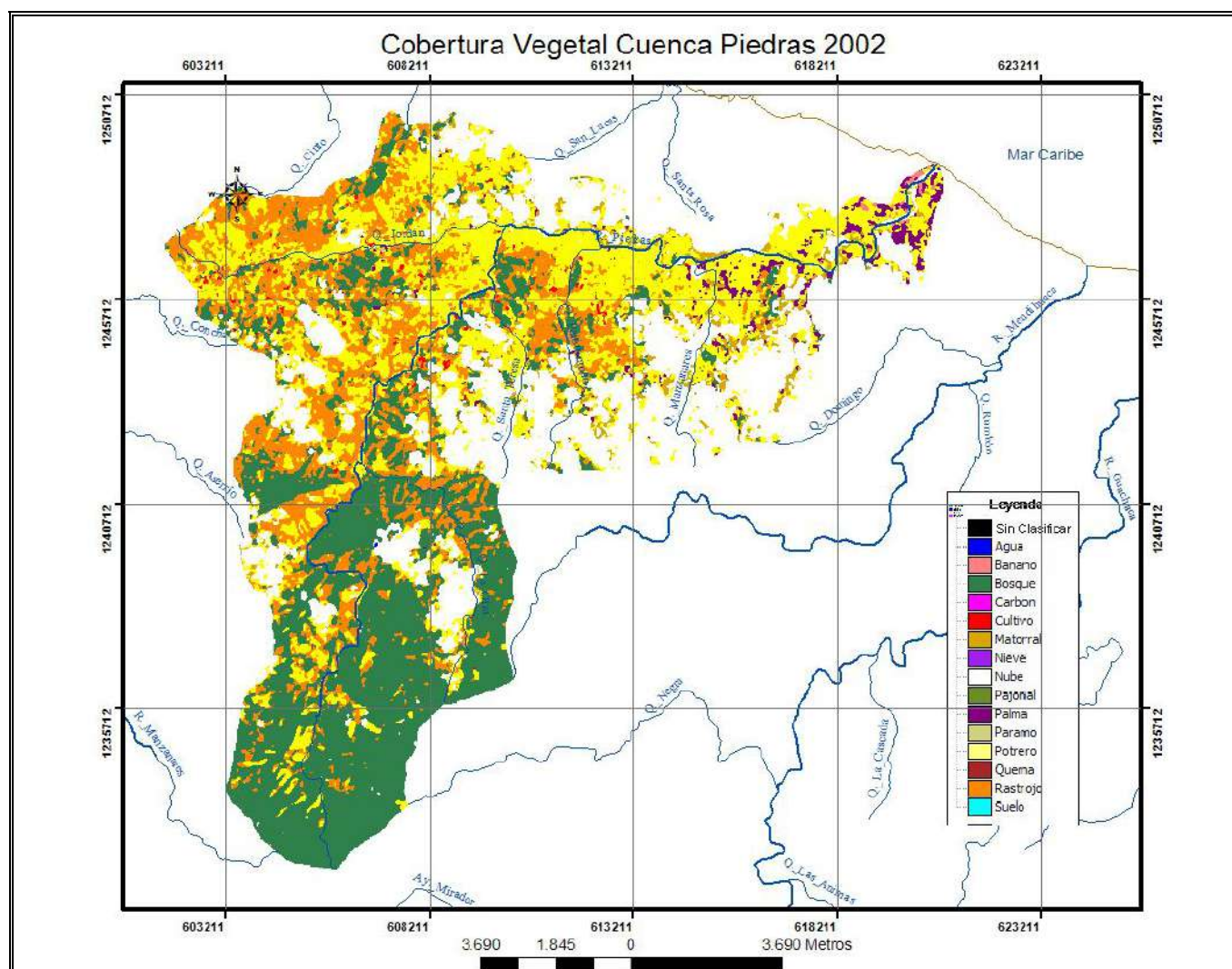
### Anexo 17. Números de curva de escorrentía correspondientes a tres condiciones de humedad antecedente CHA

CHA II	CHA I	CHA III
100	100	100
99	97	100
98	94	99
97	91	99
96	89	99
95	87	98
94	85	98
93	83	98
92	81	97
91	80	97
90	78	96
89	76	96
88	75	95
87	73	95
86	72	94
85	70	94
84	68	93
83	67	93
82	66	92
81	64	92
80	63	91
79	62	91
78	60	90
77	59	89
76	58	89
75	57	88
74	55	88
73	54	87
72	53	86
71	52	86
70	51	85
69	50	84
68	48	84
67	47	83
66	46	82
65	45	82
64	44	81
63	43	80
62	42	79
61	41	78

CHA II	CHA I	CHA III
60	40	78
59	39	77
58	38	76
57	37	75
56	36	75
55	35	74
54	34	73
53	33	72
52	32	71
51	31	70
50	31	70
49	30	69
48	29	68
47	28	67
46	27	66
45	26	65
44	25	64
43	25	63
42	24	62
41	23	61
40	22	60
39	21	59
38	21	58
37	20	57
36	19	56
35	18	55
34	18	54
33	17	53
32	16	52
31	16	51
30	15	50
25	12	43
20	9	37
15	6	30
10	4	22
5	2	13
0	0	0



**Anexo 18. Cobertura vegetal de la Cuenca del Río Piedras  
Fuente Fundación Prosierra Nevada de Santa Marta**



Alejandra Londoño González  
Fernando Javier Ortiz Pérez

**Anexo 19. Factores de corrección de evapotranspiración potencial mensual  $K_a$ , dados por el método de Thorntwaite, para ajustarlo al número de días del mes y a la duración del brillo diario, en los varios meses del año y en latitudes entre 15°N y 37°S**

Latitud	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
15°N	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	0.95	0.97
10°N	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.05	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
5°N	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02
Ecuador	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5°S	1.06	0.95	1.04	1.00	1.02	0.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10°S	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15°S	1.12	0.98	1.05	0.98	0.98	0.94	0.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20°S	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99	1.00	1.08	1.09	1.15
22°S	1.14	1.00	1.05	0.97	0.95	0.90	0.94	0.99	1.00	1.09	1.10	1.16
23°S	1.15	1.00	1.05	0.97	0.95	0.89	0.94	0.98	1.00	1.09	1.10	1.17
24°S	1.16	1.01	1.05	0.96	0.94	0.89	0.93	0.98	1.00	1.10	1.11	1.17
25°S	1.17	1.01	1.05	0.96	0.94	0.88	0.93	0.98	1.00	1.10	1.11	1.18
26°S	1.17	1.01	1.05	0.96	0.94	0.87	0.92	0.98	1.00	1.10	1.11	1.18
27°S	1.16	1.02	1.05	0.96	0.93	0.87	0.92	0.97	1.00	1.11	1.12	1.19
28°S	1.19	1.02	1.06	0.95	0.93	0.86	0.91	0.97	1.00	1.11	1.13	1.20
29°S	1.19	1.03	1.06	0.95	0.92	0.86	0.90	0.96	1.00	1.12	1.13	1.20
30°S	1.20	1.03	1.06	0.95	0.92	0.85	0.90	0.96	1.00	1.12	1.14	1.21
31°S	1.20	1.03	1.06	0.95	0.91	0.84	0.89	0.96	1.00	1.12	1.14	1.22
32°S	1.21	1.03	1.06	0.95	0.91	0.84	0.89	0.95	1.00	1.12	1.15	1.23
33°S	1.22	1.04	1.06	0.94	0.90	0.83	0.88	0.95	1.00	1.13	1.16	1.23
34°S	1.22	1.04	1.06	0.94	0.89	0.82	0.87	0.94	1.00	1.13	1.16	1.24
35°S	1.23	1.04	1.06	0.94	0.89	0.62	0.87	0.94	1.00	1.13	1.17	1.25
36°S	1.24	1.04	1.06	0.94	0.88	0.81	0.86	0.94	1.00	1.13	1.17	1.26
37°S	1.25	1.05	1.06	0.94	0.88	0.80	0.86	0.93	1.00	1.14	1.18	1.27

**Anexo 20. Temperatura media mensual multianual (°C),  
estaciones Parque Tayrona y San Lorenzo**

Mes	Estación	
	Parque Tayrona	San Lorenzo
Enero	20.5	12.0
Febrero	19.6	12.3
Marzo	21.0	12.1
Abril	22.7	13.2
Mayo	23.2	13.0
Junio	22.3	13.1
Julio	20.9	12.9
Agosto	22.1	12.8
Septiembre	22.0	11.8
Octubre	21.8	11.0
Noviembre	21.7	12.3
Diciembre	20.9	9.9

**Anexo 21. Valores de los parámetros B y n para  
determinar el Hidrograma Unitario Sintético de  
Williams y Hann**

